

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Факультет інформатики та обчислювальної техніки
Автоматизованих систем обробки інформації і управління**

«На правах рукопису»
УДК 004.925.3 .

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ О.А.Павлов
«__» _____ 2018 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 8.05010301 Програмне забезпечення систем

на тему: «Засоби моделювання освітлення у віртуальній реальності»

Виконав (-ла):

студент (-ка) VI курсу

Шматов Ярослав Ростиславович _____

Керівник:

доцент, к.т.н., доцент

Баклан І.В. _____

Рецензент:

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних посилань.
Студент (-ка) _____

Київ – 2018 року

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація: 105 с., 48 рис., 7 табл., 1 додаток, 22 джерела.

Актуальність теми.

Технології віртуальної реальності можуть бути використані у багатьох сферах: для навчання майбутніх спеціалістів, для попереднього огляду нового продукту, для віртуального макетування будівель без формування фізичних макетів. Однак на даний момент ця технологія ще доволі нова і вимагає доробки багатьох елементів. Одним з найосновніших таких елементів є швидкодія відображення тривимірної сцени віртуальної реальності, основною частиною якої є моделювання освітлення у віртуальному просторі.

Мета роботи і задачі дослідження.

Метою магістерської дисертації є розробка програмного забезпечення моделювання освітлення у віртуальній реальності. Для досягнення мети визначені завдання, які вирішуються в роботі:

- 1) провести огляд наявних методів моделювання освітлення у тривимірному віртуальному середовищі;
- 2) розробити програмне забезпечення моделювання освітлення у віртуальній реальності;
- 3) провести тестування створеного програмного забезпечення для перевірки використання ресурсів розробленим підходом;
- 4) на основі результатів тестування виконати аналіз та скорегувати обраний метод для оптимізації використання ресурсів програмним забезпеченням.

Об'єкт дослідження.

Об'єктом дослідження є швидкодія механізмів відображення графічної інформації, що формується за допомогою методів моделювання освітлення.

Предмет дослідження.

Предметом дослідження є метод моделювання освітлення на основі процедурного текстурування.

Методи дослідження.

Методами дослідження є методи моделювання освітлення у віртуальній реальності, експериментальна перевірка моделі освітлення у віртуальній реальності, вимірювання показників використання ресурсів механізмами відображення графічної інформації.

Наукова новизна отриманих результатів.

Наукова новизна визначається такими теоретичними і практичними результатами:

- 1) створено новий метод моделювання освітлення на основі процедурного текстуровання;
- 2) розроблено нове програмне забезпечення для виконання попереднього моделювання освітлення та основного моделювання освітлення у режимі реального часу, який ґрунтується на використанні процедурного текстуровання мап освітлення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційну роботу виконано у межах науково-дослідної роботи кафедри АСОІУ Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» «Інтелектуальні методи програмування, моделювання і прогнозування». Державний реєстраційний номер 0117U000926.2017-2020pp.

Публікації

- Шматов Я.Р. «Модель освітлення у віртуальній реальності, що базується на технології процедурних текстур», IX Міжнародна науково-практична інтернет-конференція «Весняні наукові читання»;
- Шматов Я.Р. «Процедурний підхід до моделювання освітлення у віртуальній реальності», II Міжнародна науково-практична конференція «Актуальні наукові проблеми. Розгляд, рішення, практика».

ABSTRACT

Master's thesis: 105 pages, 48 figures, 7 tables, 1 appendix, 22 references.

Relevance.

Virtual reality technologies can be used in many areas: for future professionals training, for the preliminary review of a new product, for the virtual layout of buildings without creation of physical mock-ups. However, at the moment, this technology is still quite new and requires the completion of many elements. One of the most important of these elements is the speed of three-dimensional virtual reality scene visualization, the main part of which is lighting simulation in the virtual space.

Purpose and objectives of the study.

The purpose of the master's thesis is to develop a software for lighting simulation in virtual reality. To achieve the goal next tasks were identified, which are addressed in the work:

- a) review the existing lighting simulation methods in a three-dimensional virtual environment;
- b) develop lighting simulation software;
- c) conduct testing of the created software for checking the use of resources by the developed approach;
- d) based on the test results, analyze and adjust the chosen method to optimize the use of resources by software.

Object of study.

The object of the study is the speed of the mechanisms for graphical information visualization, which is formed using lighting simulation methods.

Subject of research.

The subject of the study is the method of lighting modeling based on procedural texturing.

Methods.

Research methods are lighting simulation methods in virtual reality, experimental verification of the lighting model in virtual reality, measuring the use of resources by the mechanisms of graphical information visualization.

Scientific novelty of research.

Scientific novelty is determined by the following theoretical and practical results:

- a) a new method of lighting modeling was created based on procedural texturing;
- b) new software has been developed to perform preliminary modeling of illumination and basic real-time lighting modeling, which is based on the use of procedural texturing of lighting maps.

Publications

- Шматов Я.Р. «Модель освітлення у віртуальній реальності, що базується на технології процедурних текстур», IX Міжнародна науково-практична інтернет-конференція «Весняні наукові читання»;
- Шматов Я.Р. «Процедурний підхід до моделювання освітлення у віртуальній реальності», II Міжнародна науково-практична конференція «Актуальні наукові проблеми. Розгляд, рішення, практика».

ЗМІСТ

Вступ10

1 Огляд предметної області11

1.1 Поняття «моделювання освітлення»11

1.2 Обмеження віртуальної реальності12

1.3 Огляд існуючих підходів моделювання освітлення13

1.3.1 Підходи моделювання статичного освітлення14

1.3.2 Підходи моделювання динамічного освітлення17

1.3.3 Висновки до підходів моделювання освітлення22

1.4 Огляд існуючих підходів оптимізації моделювання освітлення22

1.4.1 Попередній розрахунок освітлення23

1.4.2 Підхід відкладеного затінення24

1.4.3 Висновки до підходів оптимізації моделювання освітлення25

1.5 Технологія процедурних текстур25

1.5.1 Використання для моделювання освітлення26

1.5.2 Висновки до використання процедурних текстур28

1.6 Висновки до розділу28

2 Математична модель30

2.1 Розповсюдження світла30

2.1.1 Джерела світла30

2.1.2 Явища розповсюдження світла32

2.1.3 Очікуваний результат для систем реального часу34

2.1.4 Висновки до розповсюдження світла35

2.2 Побудова моделі освітлення36

2.2.1 Трасування світлових променів36

2.2.2 Збір результатів і підготовка текстур освітлення	38
2.2.3 Використання текстури освітлення	43
2.2.4 Висновки щодо побудованої моделі	44
2.3 Моделювання динамічного освітлення	45
2.3.1 Джерела світла зі зміною інтенсивності у часі	45
2.3.2 Освітлення динамічних об'єктів	48
2.3.3 Розрахунок тіней від динамічних об'єктів	49
2.3.4 Висновки до моделювання динамічного освітлення	51
2.4 Висновки до розділу	52
3 Архітектура програмного забезпечення	53
3.1 Загальний огляд програмного забезпечення	53
3.2 Центральний компонент Core	55
3.2.1 Структура віртуального тривимірного простору	55
3.2.2 Механізм трасування тривимірного простору	66
3.2.3 Механізм розрахунку розповсюдження світла у тривимірному просторі	68
3.2.4 Механізм растеризації тривимірного простору	70
3.3 Додатковий компонент Tools	71
3.4 Застосунок Editor	72
3.5 Висновки до розділу	73
4 Аналіз розробленого засобу моделювання освітлення	74
4.1 Порівняння з існуючими підходами	74
4.1.1 Відображення відблисків	74
4.1.2 Відображення тіней	78
4.1.3 Освітлення складної сцени	81

4.2 Висновки до розділу	86
Загальні висновки	87
Перелік посилань	88
Додаток А Діаграма класів представлення тривимірного простору	91
Додаток Б Діаграма класів розрахунку моделі освітлення	93
Додаток В Екрани додатку	95
Додаток Г Результати роботи	97

ВСТУП

Технології комп'ютерної візуалізації набули широкого розповсюдження у всьому світі. Вони використовуються у найрізноманітніших сферах: починаючи від відображення проміжних результатів і прототипування на виробництвах, та закінчуючи наочною демонстрацією складних для відтворення явищ під час навчання, а також специфічному впливу на людей певними психологічно-обумовленими образами.

Найбільшою ступінню занурення з-поміж усіх технологій виділяється технологія віртуальної реальності. Дана технологія набула активного розвитку лише у останні роки та має певний ряд невирішених проблем. Окрім питань технічної реалізації наявною є проблема моделювання освітлення, від якої безпосередньо залежить досвід користувача під час використання систем даного сімейства. Так від швидкості формування наступного знімку віртуального тривимірного простору залежить можливість користувача продовжувати роботу з пристроями віртуальної реальності упродовж тривалих проміжків часу, а також відсутність у спостерігача проявів морської хвороби.

Варто зазначити, що на даний момент найдоступнішими пристроями для роботи з віртуальною реальністю є мобільні телефони. Однак дані пристрої характеризуються певними обмеженнями у розмірі наявної відеопам'яті, а також потужності графічних адаптерів. Через це існує необхідність створення підходів до моделювання освітлення, що будуть задовольняти даним обмеженням, та при цьому даватимуть змогу для відображення достатньої кількості графічних елементів віртуального простору.

Метою даної роботи є пропозиція альтернативного підходу моделювання освітлення, що дозволить зменшити, у порівнянні з існуючими підходами, вимоги до об'єму відеопам'яті та потужності графічних адаптерів розрахункових пристроїв, що використовуються для віртуальної реальності.

1 ОГЛЯД ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Поняття «моделювання освітлення»

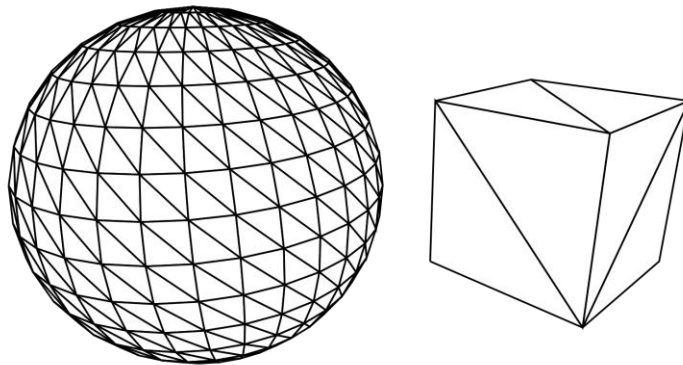
Під поняттям «моделювання освітлення» розуміють процес побудови моделі розповсюдження світла у віртуальній тривимірній сцені, а також визначення кількості та напрямку переміщення світла, що надходить до кінцевого спостерігача.

Відповідно до побудованих моделей освітлення, що надійшли до кінцевого спостерігача, формується зображення – знімок тривимірної віртуальної сцени. Даний процес має назву «візуалізація» або «рендеринг». Механізми що виконують даний процес називають рендерами.

Віртуальна тривимірна сцена – це певна модель простору з описом геометричних даних об'єктів розміщених у певному порядку, характеристик їх кольорів та матеріалів, джерел світла та інших додаткових відомостей.

У найпоширенішому випадку геометричні дані представляються у вигляді розбиття поверхонь тривимірних об'єктів на певні мінімальні геометричні елементи. Дані елементи мають назву «полігон» та найчастіше мають форму трикутника. Сукупність полігонів з'єднаних між собою називають полігональною сіткою (див. рисунок 1.1). Описаний формат даних є стандартом та використовується на апаратному рівні графічними прискорювачами під час візуалізацій тривимірних графічних даних. Відповідно до цього, даний формат буде розглянутий як основний у даному документі.

Існують також і інші варіанти опису геометричних форм об'єктів. Наприклад, кожен об'єкт може представлятись у вигляді композиції певних мінімальних тривимірних фігур на кшталт сфер, паралелепіпедів, пірамід, конусів тощо. До кожної з даних фігур можуть бути застосовані певні геометричні перетворення, до числа яких входять переміщення, поворот, масштаб. Композиція об'єктів виконується за допомогою певного набору операцій: об'єднання, перетин, різниця. Так як даний формат даних може бути перетворений у вигляд полігональної сітки – він розглядатись надалі не буде.



і назвою
ерованих
ляє Sony,
до цього
подібних

у, рівний

...бразитись
графічна інформація кінцевому користувачеві. За цей час, окрім самої візуалізації, також мають пройти процеси обробки користувальницького введення (у випадку шоломів віртуальної реальності: поворот голови, зміна положення додаткових контролерів, тощо), оновлення віртуального простору, а також можливі додаткові операції.

Варто зазначити, що візуалізація віртуального простору залежить напряду від результатів оновлення віртуального простору, що, у свою чергу, залежить від результуючих показників обробки користувальницького введення. Відповідно до цього, а також з урахуванням додаткових системних процесів необхідних для взаємодії з пристроями, в тому числі графічним процесором, можна стверджувати, що візуалізація має займати менш ніж 16 мілісекунд. В залежності від реалізації додаткових компонентів, результуюче значення може зменшитись у кілька разів.

Окрім того, за виділений час на візуалізацію має формуватись не одне зображення, а два – під кожне око спостерігача окремо. Відповідно до цього оптимальним підходом буде розрахунок найбільшої спільної частини окремо від специфічної під кожне око, з метою зменшення загального необхідного часу для підготування результуючої графічної інформації.

Ще одним важливим моментом є те, що найбільш доступними пристроями віртуальної реальності, на даний момент, є телефони з додатковими шоломами на кшталт Google Cardboard. Дані пристрої привносять свої додаткові обмеження на потужності графічних процесорів, а також на доступний об'єм відеопам'яті, що є помітно меншими від сучасних рішень на основі персональних комп'ютерів та інших спеціалізованих технічних рішень.

1.3 Огляд існуючих підходів моделювання освітлення

Підходи моделювання освітлення ділять на два види:

- моделювання статичного освітлення;
- моделювання динамічного освітлення.

Під моделлю статичного освітлення розуміється модель освітлення, де всі джерела світла та всі об'єкти у віртуальній сцені є статичними та не змінюються у часі. Спостерігач, при цьому, може змінювати своє місцеположення та переміщуватись по віртуальному просторі.

Варто зазначити, що модель статичного освітлення може бути також складовою моделі динамічного освітлення. Таким чином, для певних елементів сцени буде застосована модель статичного освітлення, а для інших елементів буде застосована модель динамічного освітлення. Також допускається застосування двох моделей до одного об'єкту одночасно. Наприклад: динамічний об'єкт перекриває потік світла від статичного джерела освітлення до статичного об'єкту у віртуальній сцені, у результаті чого поверх складової визначеної моделлю статичного освітлення буде накладена складова визначена динамічною моделлю. Тобто, на статичному об'єкті буде намальована тінь від динамічного об'єкта.

Під моделлю динамічного освітлення розуміється модель освітлення, де певне джерело освітлення чи певний об'єкт може, але не обов'язково, змінити своє місцеположення чи деякі інші характеристики.

Для кожної з вищеназваних моделей існує певний ряд підходів, що на даний момент широко використовуються у різноманітних графічних рушіях та інших графічних візуалізаторах.

Окрім вищеназваних підходів також існує ряд інших підходів моделювання освітлення, що використовуються у різноманітних професійних програмних застосунках. До числа таких алгоритмів входять трасування променів, трасування шляхів, рейкастинг, тощо. Дані підходи, в першу чергу, орієнтовані на максимальну якість та фізичну достовірність, а не на досягнення певного рівня кадрів за секунду у режимі реального часу. Через це дані алгоритми для розрахунку у режимі реального часу розглянуті не будуть.

1.3.1 Підходи моделювання статичного освітлення

У загальному випадку, підходи моделювання статичного освітлення полягають у формуванні світлових мап – певних текстур, для яких застосовуються наступний ряд операцій:

- дані текстури певним чином співставляються з освітленими статичними об'єктами;
- текстури, що співставлені з певними статичними об'єктами, співставляються з геометричною інформацією поверхні відповідних об'єктів;
- у самій текстурній інформації зберігається інформація про рівень освітленості таким чином, що зазначений рівень освітленості у певній точці текстури відповідає рівню освітленості у відповідній точці на поверхні тіла.

В залежності від підходу може варіюватись кількість шарів мапи освітлення, а також набір інформації що в даних мапах зберігається. Відповідно до цього, під час формування результуючого зображення, до уваги береться інформація про матеріал освітлюваної поверхні, співставляється з набором даних описаним у світлових мапах та певним чином визначається результуючий колір, який бачить спостерігач.

До найпоширеніших підходів моделювання статичного освітлення з використанням мап освітлення відносять:

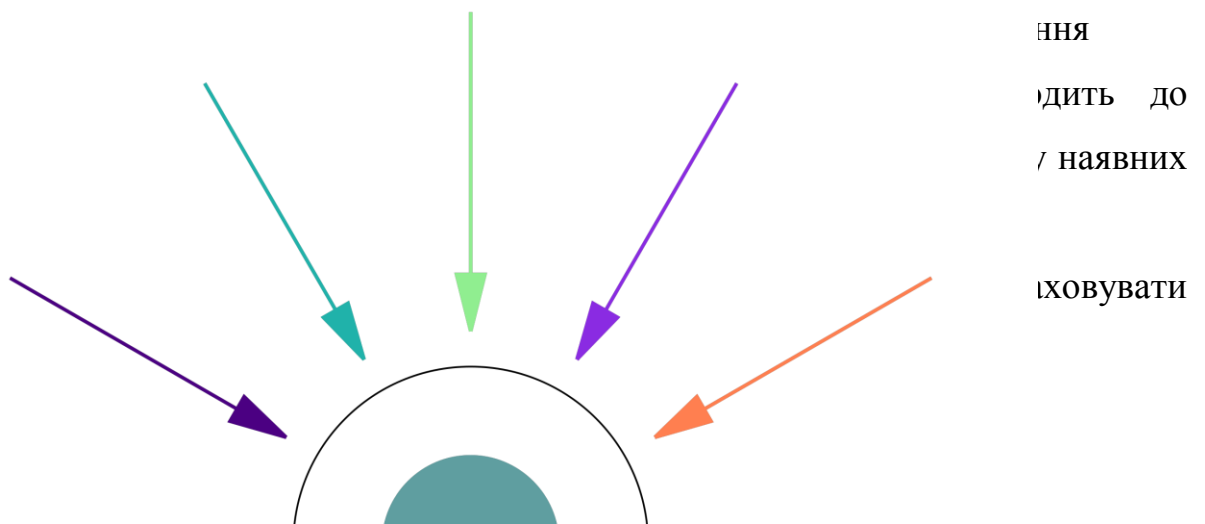
- ненаправлені мапи освітлення;
- направлені мапи освітлення;
- направлені мапи освітлення з інформацією про відблиск.

Ненаправлені мапи освітлення використовують лише один шар мап освітлення, тобто використовують лише одну текстуру для збереження інформації про освітлення.

У даному випадку всі розрахунки виконуються з розрахунку на те, що поверхня тіла повністю розсіює світло і окрім цього інших властивостей не має. Якщо ж матеріал передбачає різного роду відблиск – дані явища, за використанням даного підходу, будуть пропущені.

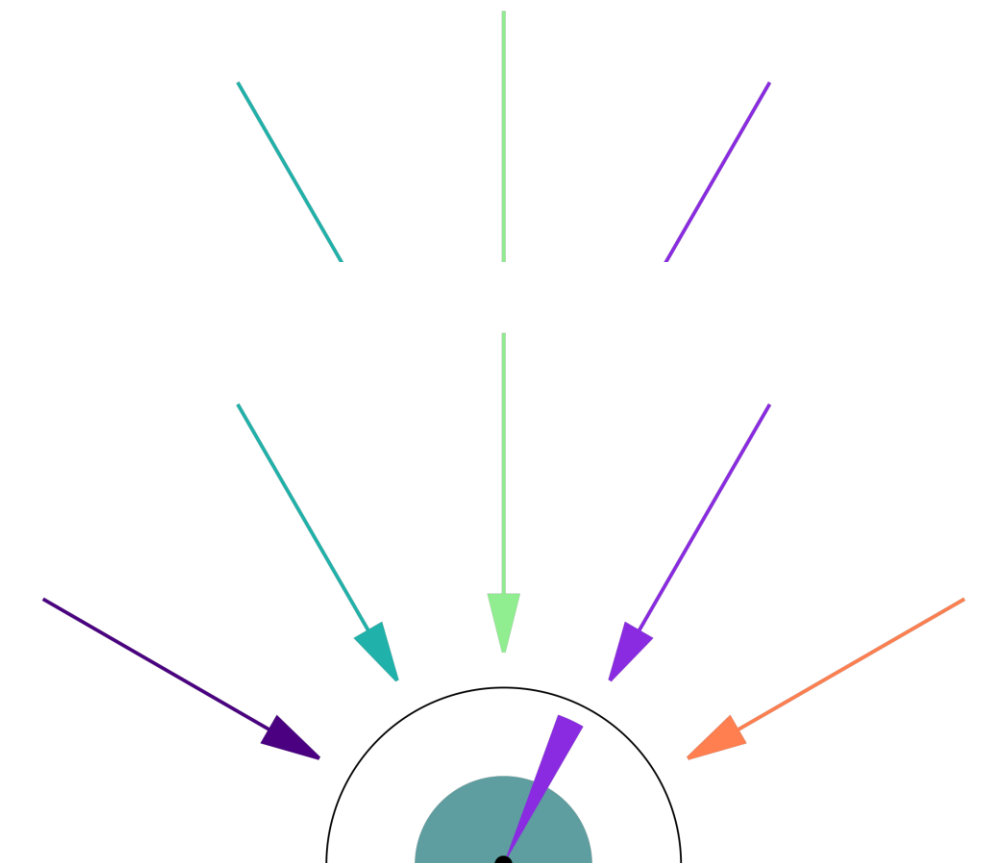
У разі використання даного підходу до об'єктів, що не відповідають початковим вимогам, певний ряд деталей буде пропущений і, тим самим, буде знижена якість результуючого зображення. Даний підхід може бути використаний для об'єктів, які знаходяться на достатній відстані від спостерігача – тоді ряд втрачених деталей буде впливати на результуюче зображення мінімально і дані явища можна буде опустити.

Направлені мапи освітлення є розширеним варіантом ненаправлених мап освітлення. Окрім інформації про ступінь освітлення також зберігається домінантний напрямок світла, тобто напрямок, з якого у певну точку поверхні об'єкта надійшло найбільше світла, а також значення відсоткової частини світла, що надійшло саме з відповідного напрямку у певну точку поверхні об'єкта. Для збереження даної інформації використовується додатковий шар мапи освітлення.



Певний підхід має ряд специфічних обмежень. Наприклад, даний відблиск може бути відображений не більше ніж з одного напрямку та лише у вигляді підсилення змішаного результуючого кольору освітленості поверхні. Випадки, коли певна точка поверхні об'єкта освітлена декількома джерелами світла, кожен з яких може відобразитись у вигляді відблиска на результуючому зображенні, а також коли колір з домінантного напрямку відрізняється від середнього розрахованого з усіх напрямків, у даному випадку врахуватись не можуть.

Підхід направлених мап освітлення з інформацією про відблиск є подальшим розширенням попереднього варіанту. У даному випадку шари мапи освітлення діляться на дві частини – одна зберігає інформацію про пряме освітлення, а інша зберігає інформацію про непряме. У результаті даних змін збільшується якість розрахунку освітлення, у порівнянні з попереднім підходом, деталізується колір відблиску та зменшується результуюча похибка від фізично-правильного очікуваного результату.



ня
там'яті, а
на етапі

ія з

заклиним
ення – на
равильно
ідженні у
тлення з
що буде

обрана завелика мапа освітлення – це проявиться у надмірному використанні відеопам'яті, що може бути критичним у певних ситуаціях.

Існує окремий підхід, що не використовує мапи освітлення – встановлення певного рівня оточуючого освітлення. У даному випадку вважається що все світло рівномірно розсіється по всьому просторі сцени. У результаті обрахування розповсюдження світла від будь-якого з джерел світла, а також відблисків та іншої інформації не відбувається. Даний підхід є найменш інформативним та забезпечує найменшу якість зображення. Однак, він може бути застосований до сцен з мінімальним освітленням (наприклад, нічним без додаткових місцевих джерел світла), де даного рівня якості буде достатньо.

1.3.2 Підходи моделювання динамічного освітлення

У основі майже всіх підходів до моделювання динамічного освітлення лежить один з двох найвідоміших методів тонування:

- метод тонування Гуро;
- метод тонування Фонга.

Обидва методи слугують для визначення рівня освітленості поверхні тіла в залежності від поточного розміщення і характеристик джерела освітлення.

Метод тонування Гуро є найлегшим з обидвох названих методів. Відповідно до нього, рівень освітленості розраховується у кожній окремій вершині освітлюваного тіла (вершини полігонів), а після цього дані значення інтерполюються по поверхні освітлюваного тіла (окремо на кожному полігоні від вершини до вершини) і таким чином визначається освітленість будь-якої з точок тіла у віртуальному тривимірному просторі. Даний підхід найбільше підходить до об'єктів, для яких кожен з полігонів на екрані буде займати невелику площу. У інших випадках великою є ймовірність отримання у результаті неправильно освітленої поверхні.

Варто також зазначити, що до гарних практик побудови тривимірних моделей, входить необхідність використання найменшої кількості полігонів. Це, у першу чергу, впливає на час, необхідний для обробки тривимірної моделі

на графічному прискорювачі. Залежність є прямо-пропорційною – чим більше полігонів, тим більше необхідно часу для відображення об'єкту. Відповідно до цього, підхід тонування Гуро на даний момент не є найкращим варіантом.

За методом тонування Фонга, на відміну від методу тонування Гуро, можна розрахувати освітленість у кожній окремій точці поверхні тіла незалежно від вершин полігонів. Даний підхід є алгоритмічно складнішим, у порівнянні з методом тонування Гуро. Однак, з урахуванням сучасного розвитку технологій, різниця у часі, необхідному для розрахунку освітлення у віртуальному просторі окремо методом Фонга і методом Гуро, вважається несуттєвою.

Метод тонування Фонга виділяє чотири компоненти розрахунку освітленості поверхні тіла:

- оточуюче світло віртуального простору;
- розсіяне тілом світло від джерел освітлення;
- відблиск тілом світла від джерел освітлення;
- випромінювання світла тілом особисто.

Варто відмітити, що дана модель не враховує освітлення певного тіла розсіяним світлом інших тіл. У розрахунку використовується лише світло, що падає напряду від джерел світла. У першу чергу це пов'язано з алгоритмічною складністю, що виражається у потребі додаткового часу візуалізації, що не завжди може бути наявним чи допустимим.

Окрім того, дана модель не враховує тіла, що можуть знаходитись між джерелом світла та освітлюваним тілом. Тобто, інформація про тіні у даному алгоритмі ніяк не обраховується і не згадується.

Для розрахунку тіней використовуються додаткові методи. До таких методів відносять:

- метод розрахунку мапи тіней;
- метод NVIDIA PCSS;
- метод стенсильних тіней.

Метод розрахунку мапи тіней є найпоширенішим. Даний метод, або його модифікації, використовуються у багатьох сучасних механізмах візуалізації у режимі реального часу.

Відповідно до нього виконується відображення віртуального простору з кута зору джерела освітлення. У випадку, коли джерело освітлення є однонаправленим – обирається напрямок у сторону тієї частини віртуального простору, у яку напрямлений погляд спостерігача. При цьому відображається не уся сцена, а лише інформація про віддаленість найближчих поверхонь тіл до джерела світла. Результуюче зображення має назву мапи тіней.

В ідеальному випадку, подібні мапи тіней розраховуються для кожного з окремих джерел світла. Однак дана процедура вимагає забагато часу для виконання усіх відображень, а також, за великої кількості джерел світла, може використати забагато відеопам'яті для збереження усіх розрахованих текстур. Відповідно до цього з-поміж усіх джерел світла обирають найголовніші, лише які зможуть враховувати розміщення тіл для визначення результуючих тіней віртуального простору.

Під час відображення віртуального простору спостерігачеві, кожна з освітлюваних точок перевіряється на віддаленість від джерела освітлення, після чого отримане значення порівнюється зі значенням на мапі тіней, що відповідає напрямку до поточної освітлюваної точки. Якщо освітлювана точка знаходиться далі порівняно з відстанню, на яку світить дане джерело за відповідним напрямом – або пропускається освітлення точки, або виконується накладання тіні. У інших випадках рівень освітленості освітлюваної точки визначається за звичайним алгоритмом.

Одним з основних недоліків даного підходу є необхідність підбору розміру мапи тіней. За обраного замалого розміру можливим є неприродне сегментування тіней, а за зовеликого розміру можливе використання надмірного часу для підготування відповідних мап, а також надмірного використання відеопам'яті.

Окрім того, наявними є проблеми, що пов'язані з апаратним округленням дробових чисел. У випадку, коли значення відстані за певним напрямом було округлене у меншу сторону – можлива поява додаткових тіней на поверхні, до яких шлях світла не є перекритим. Дану проблему можна вирішити додавши певне значення похибки. Однак, якщо дане значення буде взяте з великим – можливі випадки пропускання світла через певні об'єкти. Якщо дане значення буде замалим – проблема може бути вирішена лише частково. Відповідно до цього – з використанням даного підходу необхідним є підбір правильного значення похибки для здобуття найкращого з можливих варіантів.

Метод NVIDIA PCSS (Percentage Close Soft Shadows) є розширенням методу тіньових мап. Розширення, у першу чергу, стосується етапу порівняння відстані на мапі тіней з відстанню від спостерігача. Відповідно до методу NVIDIA PCSS, порівняння відбувається не для єдиної точки, що відповідає напрямку освітлюваної точки, а певному околу. Відповідно до цього визначається не просто наявність затінення, а відсоткова ступінь затінення, що призводить до формування напівтіней поруч зі звичайними тінями.

Даний алгоритм є значно складнішим у порівнянні зі звичайним алгоритмом тіньових мап. У даному випадку алгоритмічна складність збільшується пропорційно площі околу, що перевіряється. Варто зазначити, що розмір даного околу напряму залежить від обраного розміру мапи тіней, тому зі збільшенням розміру мапи тіней результуюча складність збільшується квадратично. Однак, враховуючи згладжування результатів розрахунку через оцінку околу, можливим є використання меншої за розміром мапи тіней у порівнянні зі звичайною методом розрахунку мап тіней.

Метод стенсильних тіней є окремим алгоритмом розрахунку тіней. Даний алгоритм використовується саме для розрахунку тіней і для визначення необхідності освітлення певним з джерел може бути використаний лише з рядом певних модифікацій.

У основі даного алгоритму є використання стенсильного буферу відеоприскорювача. Даний буфер здатний зберігати цілочисельні значення, та

підтримує ряд певних операцій, що будуть виконані у випадку проходження всіх перевірок відповідної обчислювальної точки. Для даного алгоритму знадобляться операції збільшення на одиницю та зменшення на одиницю.

Важливим етапом є підготовка геометричних даних. Дана підготовка відбувається для кожної пари джерела освітлення та об'єкту, що може кинути тінь. Для кожної з таких пар будується усічена піраміда з вершиною у джерелі світла, однією гранню на рівні об'єкта, що кидає тінь (може відповідати певному полігону чи набору полігонів тіла), і іншою гранню на відстані максимального потрапляння світла.

Усі підготовлені усічені піраміди відображаються лише у стенсильний буфер і лише після відображення основної сцени. Спочатку відображаються ті стінки пірамід, нормалі до яких напрямлені у сторону спостерігача (є видимими). При цьому використовується операція збільшення на одиницю у стенсильному буфері. Таким чином для усіх видимих частин пірамід, що не приховуються геометрією віртуального простору, у стенсильному буфері буде встановлене певне значення, що є більшим за одиницю. Після цього виконується та ж сама процедура, тільки зі стінками пірамід, нормалі до яких напрямлені у сторону протилежну спостерігачеві (є невидимими), а також буде використана операція зменшення на одиницю у стенсильному буфері. Таким чином у всіх місцях, де усічені піраміди були видимі наскрізь залишиться значення рівне нулю. У тих місцях, де передня стінка піраміди перекривала певний простір, за яким була прихована задня стінка – буде сформована тінь.

Для даного алгоритму параметру, від якого залежить візуальна якість тіней, немає. Усі тіні, що потрапляють у кадр, будуть відображені саме по межах сформованих усічених пірамід затінення.

На відміну від NVidia PCSS, даний алгоритм не здатний формувати напівтіні. Можливою є модифікація, де окрім однієї усіченої тіньової піраміди, формується також додатково усічена напівтіньова піраміда. Однак даний підхід дозволяє лише отримати один крок напівтіней, і при цьому алгоритмічна складність зростає в два рази.

Порівнювати алгоритмічну складність методу стенсильних тіней і методу розрахунку тіней не є доцільним. Дані алгоритми, за своєю складністю є залежними від загальної геометричної складності (загальної кількості полігонів у сцені), вибору джерел світла та об'єктів, що будуть проєціювати тіні, обраних параметрів самих алгоритмів.

1.3.3 Висновки до підходів моделювання освітлення

Кожен з розглянутих підходів моделювання освітлення має як свої переваги, так і свої недоліки.

Основні моделі статичного освітлення, що використовуються для розрахунку освітленості статичних об'єктів від статичних джерел світла, цілком і повністю залежать від формування мап освітленості, для яких обов'язковим є правильний підбір їх розмірностей. Кожна така мапа освітленості вимагає певного місця у відеопам'яті для збереження. У випадку деяких алгоритмів, для збільшення якості розрахованого освітлення вимоги до відеопам'яті зростають у декілька разів, що може бути негативним фактором у зв'язку з обмеженнями певних пристроїв.

У загальному випадку моделі динамічного освітлення слугують лише для розрахунку прямого освітлення та не враховують об'єкти, що можуть знаходитись між джерелами світла та іншими об'єктами віртуального простору, що, за даної ситуації, мають бути затінені. Для виконання затінення необхідно впровадити додатковий механізм затінення, який вимагатиме додаткового підбору набору об'єктів, що можуть відкидати тінь, набору джерел світла, від яких може бути виконане затінення, а у деяких випадках і підібрати розмір мапи затінення та певний рівень похибки визначення затіненості об'єктів.

1.4 Огляд існуючих підходів оптимізації моделювання освітлення

Розрахунок освітлення є алгоритмічно складною задачею. Навіть з урахуванням усіх спрощень та компромісів, що допускаються у ряді методів моделювання освітлення, результуюча складність усе одно може лишатись

завеликою і затрати часу на візуалізацію окремого кадру можуть перевищувати визначений максимальний ліміт.

Відповідно до цього були розроблені певні додаткові оптимізації, що можуть додатково зменшити використання часу на процес візуалізації, а також дозволити використання більш складних та якісних методів моделювання освітлення, і при цьому за загальним часом візуалізації залишитись у встановлених вимогами межах.

1.4.1 Попередній розрахунок освітлення

Однією з найбільших оптимізацій є попередній розрахунок освітлення. Його принцип полягає у тому, що частина освітлення, що може бути визначена ще до початку візуалізації, розраховується окремо на окремому етапі підготовки. Під час візуалізації, замість розрахунку всієї інформації, використовуються результати попереднього розрахунку, що значно зменшує об'єм часу необхідний для відображення одного кадру.

Етап підготовки, на відміну від етапу візуалізації кадру, не має певного визначеного обмеження у часі, тому на даний етап можна витратити значно більше часу та отримати значно якісніший результат, у порівнянні з можливим результатом у режимі реального часу. Звичайно, це є можливим лише у випадку, коли сам алгоритм дозволяє отримати інший результат.

Найчастіше даний підхід використовується для розрахунку моделі статичного освітлення. Уся інформація, що пов'язана з моделлю статичного освітлення, не буде змінюватись між окремими візуалізаціями одного і того ж самого віртуального простору. Через це є можливість один раз виконати необхідні розрахунки, і надалі лише використовувати їх результати, які кожного разу будуть одними і тими ж самими.

Окремим випадком використання даної технології є варіант, використаний у графічному рушію Unreal Engine від Epic Games. У певному геометричному просторі обирається певна тривимірна сітка окремих точок. Для кожної з даних точок під час підготовчого етапу визначається кількість світла,

що проходить через неї у кожному з напрямків. На етапі візуалізації, для кожного динамічного об'єкту обирається найближча відповідна точка, та за її характеристиками визначається рівень освітленості самого об'єкту. Таким чином з'являється можливість враховувати розсіяне найближчими об'єктами світло, а також спростити розрахунок освітлення оточуючими джерелами світла без виконання надважких розрахунків під час візуалізації кадра віртуального простору.

1.4.2 Підхід відкладеного затінення

Відповідно до даного підходу, етап розрахунку освітлення виконується останнім під час візуалізації кадру. При цьому попередньо виконуються всі необхідні розрахунки щоб визначити точний набір точок, що будуть видимі у кадрі, і для яких варто розраховувати освітлення. Відповідно, для частини віртуального простору, що не потрапляє у поточний кадр, розрахунок освітлення буде пропущений. Зазвичай, у самому кадрі знаходиться лише невелика частина від усього простору, і, відповідно, за допомогою даного методу є можливість значно скоротити час, за який відбувається відображення кадру.

У результаті попередніх розрахунків виконується базове відображення сцени, з якого отримується наступна інформація:

- мапа віддаленості – інформація про те, наскільки кожна видима точка віддалена від спостерігача;
- мапа розміщення – інформація про те, де саме у просторі знаходиться кожна видима точка;
- мапа нормалей – інформація про перпендикуляри до поверхонь у кожній з видимих точок;
- мапа тангентів та бінормалей – додаткова інформація про властивості поверхонь у кожній з видимих точок;
- мапа матеріалів – інформація про матеріали поверхонь, яким належать видимі точки.

Після чого, подібно до пост-ефекту, виконується аналіз усієї даної інформації та виконується, відповідно, визначення освітленості у відповідності до обраних алгоритмів моделювання освітлення.

1.4.3 Висновки до підходів оптимізації моделювання освітлення

Розглянуті підходи попереднього розрахунку та відкладеного затінення дозволяють значно скоротити час, що є необхідним для відображення одного кадру віртуального простору. Досягається це шляхом розрахунку певної частини інформації та збереження результатів розрахунків для подальшого використання під час візуалізації, а також шляхом обмеження набору даних, для якого необхідно виконати розрахунки, лише до геометричного місця точок видимого простору. Варто також відзначити, що попередній розрахунок не є обмеженим у часі, тому для нього може бути використано значно більше часу, ніж це допускається у режимі реального часу, у результаті чого можна досягти більшої деталізації у обрахованих результатах, а отже і більшої достовірності отриманого у результаті знімку віртуального простору.

Так як дані підходи мають потенціал до значного скорочення часу, необхідного для відображення кадру візуалізації віртуального простору, вони рекомендуються до використання у подібних графічних системах.

1.5 Технологія процедурних текстур

Процедурні текстури, на відміну від звичайних текстур, являють собою функції, що отримують на вхід певні текстурні координати, та повертають у результаті значення кольору текстури у відповідній точці.

Ще однією основною відмінністю від звичайних текстур є спосіб їх збереження. У той час як звичайні текстури зберігаються саме у вигляді масиву точок з інформацією про кожну, текстурні координати зберігаються у вигляді скомпільованого програмного коду, який, зазвичай, займає значно менше місця порівняно з текстурною інформацією.

Окрім звичайних координатних даних, до процедурних текстур можна передавати додаткові параметри для отримання результатів. Наприклад, таким

параметром може бути момент часу, певним чином визначений у віртуальному просторі. Відповідно до цього, текстура може бути змінена, тим самим реалізуючи можливість виконання анімацій без обов'язкового збереження кожного з проміжних кадрів.

Аналогічно, можливо від процедурної текстури передавати певні додаткові відомості. Так, процедурна текстура на запит певних точок може повертати не тільки значення кольору у відповідній точці, а і значення інтенсивності, глибини, певного напрямку, і для цього не буде використано додаткових текстур, як це необхідно у випадку зі звичайними текстурними підходами.

Також важливим моментом є можливість забезпечення збільшеної деталізації у порівнянні зі звичайними текстурами. Таким чином, встановивши певні математичні залежності у основу процедурної текстури, можна бажаними інтерполяційними даними отримувати максимально наближені, чи навіть точні, дані, у той час як у випадку звичайної текстури існує обмеження до певного ряду інтерполяційних алгоритмів, а також жорстка залежність від якості початкової текстури.

Універсального порівняння алгоритмічної складності за використання процедурних текстур та класичних текстур не існує. Складність використання класичних текстур залежить від наявності та типу стиснення графічної інформації. У той час як процедурні текстури цілком і повністю залежать виключно від закладеного в них алгоритму. За необхідності, закладений алгоритм може бути спрощений чи апроксимований, тому допускається досягнення будь-якого рівня складності.

1.5.1 Використання для моделювання освітлення

На даний момент, певного підходу щодо використання процедурних текстур для моделювання освітлення немає. Загалом використовуються підходи, що базуються на класичних текстурах, чи на розрахунку освітлення у реальному часі.

Однак, використання процедурних текстур може дати наступні переваги:

- використання програмної пам'яті замість текстурної, що може результувати у меншому використанні відеопам'яті;
- можливість анімування зміни інтенсивності джерел світла без додаткового розрахунку розповсюдження освітлення від самих джерел світла у режимі реального часу;
- можливість збереження декількох домінантних напрямків розповсюдження світла.

Окрім того, можливо використати не двовимірну текстуру, що накладається на поверхню освітлюваного тіла, а тривимірну текстуру, що включає в себе тіло. У такому випадку можливе допущення мінімальних змін місцепложення самого об'єкту без повного перерахування освітлення, а лише з використанням розрахованих попередньо результатів.

Також, даний підхід може бути використаний для певного окремого простору, у результаті чого будуть визначені певні потоки розповсюдження світла, які можна буде застосовувати на окремі об'єкти, що будуть у цей простір потрапляти, подібно до підходу попередньо розрахованого освітлення використаного у Unreal Engine (див. 1.4.1).

Враховуючи те, що у даній текстурі можуть зберігатись декілька домінантних напрямків розповсюдження світла, можливою є перевірка перетину даних домінантних напрямків з певними динамічними об'єктами для перевірки затінення. Так як точок, для яких необхідно буде перевіряти затінення, а також об'єктів, з якими необхідно буде перевіряти затінення, може бути багато – можливо спростити таким чином, що виділити у динамічних об'єктах декілька критичних точок, та перевіряти, чи дані точки належать домінантним напрямкам видимих точок, що очікують затінення, що має значно меншу алгоритмічну складність, порівняно з повними перевірками.

Ще одним важливим моментом є можливість зміни алгоритмічної складності під час підготовки даних текстур. За необхідності можна буде опустити деяку додаткову інформацію, на кшталт додаткових домінантних

напрямків освітлення, у результаті чого на візуалізацію одного кадру буде йти менше часу.

1.5.2 Висновки до використання процедурних текстур

Процедурні текстури дають певний ряд переваг у порівнянні зі звичайними текстурами. До таких переваг відноситься більша гнучкість, потенційно менше використання пам'яті, можливість зміни складності текстур на рівні алгоритмів, що дозволяє вибірково спрощувати чи ускладнювати певні моменти, що не обов'язково впливають на усю текстуру цілком. Відповідно до цього, у даних текстур є значний потенціал для використання у алгоритмах моделювання освітлення. Так, порівняно зі звичайними мапами освітлення, з'являється можливість зберігати декілька домінантних напрямків, змінювати інтенсивності окремих джерел світла без необхідності виконання повноцінного розрахунку динамічного освітлення, можливість розрахунку освітлення з використанням тієї ж самої єдиної процедурної текстури.

1.6 Висновки до розділу

Існуючі методи моделювання освітлення в основному базуються на використанні звичайних текстур. Відповідно до цього існує певний ряд проблем, пов'язаний з необхідністю виділення значних об'ємів відеопам'яті спеціально під графічні текстури, розмір яких залежить прямопропорційно очікуваній точності, а також необхідністю додаткового конфігурування для отримання бажаного результату у певних для поточного віртуального простору умовах.

В умовах доступних пристроїв віртуальної реальності, об'єм відеопам'яті може бути значно обмеженим, що може стати проблемою для вивантаження усієї світлової текстурної інформації.

Рішенням у даній ситуації є процедурні текстури. Дані текстури зберігаються у вигляді скомпільованих програм, і тому можуть займати менше місця, порівняно зі звичайною текстурною інформацією. Окрім того, даний вид текстур піддається вибірковій оптимізації, завдяки чому за необхідності можна

буде спростити алгоритм текстури у найменш критичних місцях, при цьому зменшити розмір та результуючу алгоритмічну складність текстури. Також, даний вид текстур є доволі гнучким, відповідно до чого існує можливість збереження додаткової інформації без створення під це додаткових текстур, анімування певних джерел світла, отримання базової інформації для затінення.

Були розглянуті методи оптимізації попереднього розрахунку та відкладеного затінення, що значно скорочують час, необхідний для візуалізації одного кадру віртуального тривимірного простору. Окрім того, метод попереднього розрахунку дозволяє збільшити якість розрахованого освітлення завдяки відсутності обмежень на час обробки. Відповідно до цього, дані підходи будуть використані у розроблюваному комплексі програм.

2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ

2.1 Розповсюдження світла

Закони розповсюдження світла та його властивості описані оптикою – розділом фізики, що розглядає явища, пов'язані з розповсюдженням електромагнітних хвиль видимого, інфрачервоного та ультрафіолетового діапазонів спектру.

У сфері комп'ютерного моделювання освітлення за основу взяті саме закони з вищеназваного розділу. Однак використовуються вони спрощено, так як в першу чергу ставиться ціль не максимально повторити усі фізичні явища, а досягти певного рівня достовірності, достатнього для сприйняття кінцевим спостерігачем.

Окрім того, процес моделювання освітлення є обмеженим сучасними засобами розрахунку. Сучасні технічні засоби дозволяють виконувати лише певне число операцій за певний проміжок реального часу, виділений для відображення одного окремого кадру тривимірної сцени. Саме тому усі процеси, пов'язані з візуалізацією та розрахунком освітлення, мають досягати певного рівня алгоритмічної складності, за якого час візуалізації одного окремого кадру не буде перевищувати максимально допустимого значення.

Відповідно до цього була сформована математична модель для розрахунку явищ освітлення і подальшого моделювання освітлення у віртуальному просторі.

2.1.1 Джерела світла

Початком розповсюдження світла є певний набір джерел світла. Дані джерела світла є важливою частиною віртуальної тривимірної сцени. Якщо у віртуальній тривимірній сцені не буде визначене хоча б одне джерело світла, відповідно до законів збереження енергії, спостерігач не зможе сприйняти жодної світлової хвилі, а отже, і побачити видиму частину тривимірного простору.

Виділяють чотири стандартні типи джерел світла:

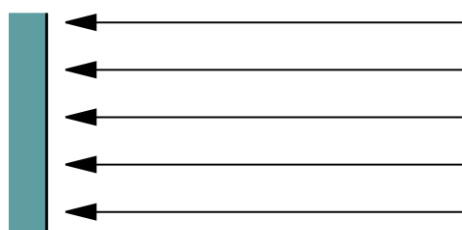
- основне (оточуюче);
- напрямлене;
- точкове;
- конусне.

Основне, або оточуюче, джерело світла є певним спрощенням і представляє собою слабоінтенсивне світло, що отримується при відбитті світла, випромінюваного будь-якими джерелами світла, від поверхонь. Загалом, дане джерело світла використовується щоб уникнути великої кількості розрахунків відбитого світла та може бути застосоване для задання загальної яскравості тривимірного віртуального простору чи його частини.

Світло основного джерела розповсюджується у всіх напрямках з однаковою інтенсивністю, рівномірно освітлюючи усі поверхні у віртуальному просторі. Для даного джерела колір може бути заданий як константним значенням для всього віртуального тривимірного простору, так і певною функцією в залежності від місцеположення у просторі.

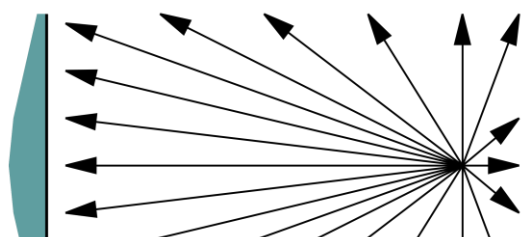
Напрявлене джерело світла випромінює світлові промені у певному напрямку з нескінченно віддаленої точки. Оскільки напрямлене джерело світла не має положення у просторі, інтенсивність світла не зменшується з відстанню, та світло розповсюджується на необмежену відстань.

Подібні джерела освітлення використовуються для моделювання джерел світла, відстань до яких є занадто великою, порівняно з розмірами спостережуваної і досяжної частини віртуального тривимірного простору. До таких джерел світла дуже часто відносять віртуальний образ сонця (див. рис. 2.1).



направлене джерело світла

випромінює світло у всіх напрямках від
)

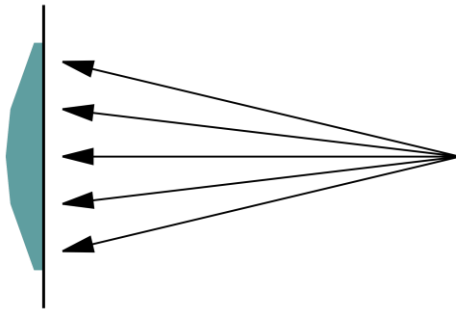


точкове джерело світла

У даному випадку, інтенсивність світла падає в залежності від відстані у відповідності з оберненим квадратичним законом.

$$C = \frac{1}{K_c + K_l \cdot d + K_q \cdot d^2} \cdot C_0 \quad (2.1)$$

Конусне джерело освітлення відрізняється від точкового чітко заданим напрямком розповсюдження світла (див. рис. 2.3).



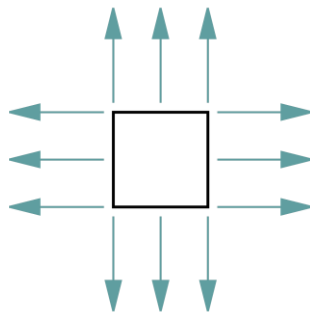
конусне джерело світла

яке розраховується подібно до точкового джерела з урахуванням конусності.

$$\frac{C_0}{d^2} \cdot \cos^2 \theta \quad (2.2)$$

Також окремо варто відзначити окреме тіло як джерело світла. Даний вид освітлення називають випромінюванням.

Вважається, що для випромінювального джерела світла світло розповсюджується у всіх напрямках рівномірно.



випромінювання світла об'єктом

світла

Основною рисою розповсюдження світла є промінь.

Хоча б одному з яких розповсюджується

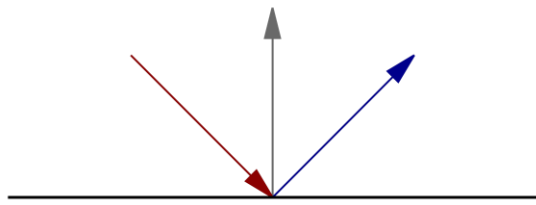
світло, можливого є зміна напрямку розповсюдження світлового потоку.

Існує також ряд явищ, що не пов'язані з перетином світлового променя межі двох просторів, але також можуть впливати на напрямок розповсюдження світла. До числа подібних явищ можна віднести, наприклад, гравітаційні лінзи. Подібні явища, зазвичай, під час моделювання освітлення тривимірного віртуального простору, до уваги не беруться.

Таким чином, під час моделювання розповсюдження світла у тривимірному віртуальному просторі, виділяють дві основні причини зміни напрямку:

- відбиття світла;
- заломлення світла.

Явище відбиття світла – фізичний процес взаємодії світлових хвиль з поверхнею, за якого змінюється напрямок розповсюдження хвильового фронту на межі двох середовищ з різними властивостями, під час якого хвильовий фронт повертається у середовище, з якого він прийшов.



Явище відбиття світла

визначає співвідношення між вхідним освітленням у вихідне
співвідношення відбивної здатності (BRDF).

$$\frac{dL_r(w_r)}{d\omega_i(w_i)\cos\theta_i dw_i} \quad (2.3)$$

Окремо можна виділити два найпоширеніші випадки виглядів даної функції.

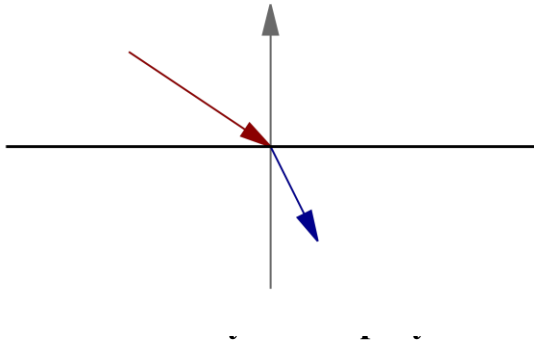
Першим з таких випадків є повністю дзеркальна поверхня, у якій відображення має місце лише за одного певного відношення напрямків, за якого напрямок вихідного світла є відображенням відносно вектора нормалі напрямком вхідного світла, а у інших випадках коефіцієнт перетворення складатиме 0.

Другим випадком є повністю розсіююча поверхня. У даному випадку існуватиме залежність лише від кута між напрямком вхідного світла та нормаллю до поверхні.

Випадок дифузної поверхні з ефектом блиску є комбінацією двох описаних вище варіантів.

Явище заломлення світла – фізичний процес взаємодії світлових хвиль з поверхнею, за якого змінюється напрямок розповсюдження хвильового фронту на межі двох середовищ, або одного середовища зі змінними властивостями, у якому швидкість розповсюдження хвилі відрізняється.

Для розрахунку перетворення вхідного освітлення у вихідне використовується двопроменева функція пропускну здатності (BTDF).



іще заломлення світла

овністю непрозорого тіла, є заломлення
відношенню швидкостей розповсюдження
я.

я систем реального часу

У якості основи для моделювання освітлення використовуватиметься модель Фонга. Відповідно до неї, виділяються чотири окремі компоненти освітленості:

- оточуюче світло віртуального простору;
- розсіяне тілом світло від джерел світла;
- відблиск тілом світла від джерел світла;
- випромінювання світла тілом особисто.

Відповідно до даних компонент освітленості визначається результуюче значення освітленості окремої точки тривимірного віртуального простору.

$$I_p = k_a i_a + k_d (L_m^\wedge \cdot \hat{N}) i_{m,d} + k_s (R_m^\wedge \cdot \hat{V})^\alpha i_{m,s} \quad (2.4)$$

Де:

k_a – коефіцієнт оточуючого відбиття;

k_d – коефіцієнт розсіюючого відбиття;

k_s – коефіцієнт відблискуючого відбиття;

α – коефіцієнт блиску;

L_m^\wedge – вектор, напрямлений від поверхні освітлюваного тіла до джерела світла;

\hat{N} – нормаль до поверхні освітлюваного тіла;

\hat{V} – вектор, напрямлений від поверхні освітлюваного тіла до віртуального спостерігача;

R_m^\wedge – відбитий поверхнею промінь світла L_m^\wedge .

$$R_m^\wedge = 2(L_m^\wedge \cdot \hat{N})\hat{N} - L_m^\wedge \quad (2.5)$$

У загальному вигляді, модель Фонга визначає освітленість окремої точки відповідно до єдиного вхідного променя освітлення. Однак, не виключається комбінація розрахованих значень для декількох вхідних променів освітлення. В цьому випадку усі окремо розраховані значення освітленості складаються разом. Помітимо, що оточуюче світло віртуального простору та випромінювання світла тілом особисто не залежить від того, з якої сторони та якої інтенсивності надходить світло. Отже, дані складові мають бути розраховані лише один раз.

$$I_p = k_a i_a + \sum_{m \in \text{lights}} (k_d (L_m^\wedge \cdot \hat{N}) i_{m,d} + k_s (R_m^\wedge \cdot \hat{V})^\alpha i_{m,s}) \quad (2.6)$$

Таким чином, для можливості використання даної моделі необхідно визначити ряд наступних додаткових параметрів:

- домінантні напрямки освітлення для визначення інформації про відблизк;
- мінімальне значення освітлення з усіх напрямків для визначення оточуючого освітлення;
- усереднене значення освітлення з усіх напрямків для визначення розсіяного освітлення.

Відповідно, дані параметри має надати сформована модель освітлення для формування результуючої інформації про освітлення, що буде відображена користувачеві.

2.1.4 Висновки до розповсюдження світла

Для визначення шляхів розповсюдження світла використовується спеціальна математична модель для розрахунку явищ освітлення, що, у якості основи, використовує певний ряд законів з розділу фізики – оптики.

У даній моделі описаний ряд джерел світла, як початкових точок розрахунку освітлення, до яких входять оточуюче, напрямлене, точкове та конусне джерела світла, а також описана можливість тіла випромінювати світло самотійно.

Окрім того описаними є явища відбиття та заломлення світла, відповідно до яких виконується розповсюдження світла у віртуальному просторі.

Грунтуючись на описаній моделі необхідно визначити параметри домінантних напрямків освітлення та усередненого значення освітлення з усіх напрямків, разом зі значенням мінімального освітлення з усіх боків, для кожної окремої точки поверхні тіла, або групи точок поверхонь тіл.

2.2 Побудова моделі освітлення

Модель освітлення являє собою певний опис розповсюдження світла у просторі.

Модель освітлення може бути побудована виключно у відповідності до певного віртуального тривимірного простору. Відповідно до описаних у віртуальному тривимірному просторі джерел світла виконується початок розрахунку розповсюдження світла. Далі, відповідно до описаної геометрії об'єктів, їх місцеположення, стану та матеріалів визначаються шляхи розповсюдження світла у віртуальному просторі. Лише у результаті даних розрахунків формується модель освітлення, відповідно до якої візуалізується віртуальний простір.

Побудована модель може існувати лише у сукупності з віртуальним тривимірним простором, на основі якого вона була побудована. Сама модель є спрощеним описом розповсюдження освітлення, і кінцеві розрахунки виконуються лише за наявності інформації про геометрію та використовувані матеріали у віртуальному просторі.

2.2.1 Трасування світлових променів

Трасування променів – підхід до дослідження оптичних систем шляхом відслідковування взаємодії окремих променів з поверхнями.

У результаті даної процедури має сформуватись інформація про те, яка кількість світла потрапила на різноманітні точки поверхонь об'єктів у віртуальному просторі. Для досягнення даної цілі використовуватимемо модифікований підхід Path Tracing.

Підготовчий етап даного підходу полягає у розміщенні на поверхнях кожного з тіл ключових точок, для яких буде виконуватись розрахунок освітлення.

Різниця від оригінального алгоритму Path Tracing полягає у тому, що вибір наступного шляху розповсюдження виконується не випадковим чином, а обирається з-поміж визначених ключових точок, що є досяжними від поточної точки, для якої виконується розрахунок.

Трасування одного променя виконуватиметься наступним чином:

- 1) обирається джерело світла як початкова точка;
- 2) обирається будь-яка досяжна наступна ключова точка;
- 3) якщо досяжних точок немає – виконується завершення операції;
- 4) відповідно до поточної ключової точки чи джерела світла визначається компонент освітленості наступної ключової точки;
- 5) значення компонента освітленості заноситься у наступну ключову точку;
- 6) якщо досягнута максимальна глибина – виконується завершення операції;
- 7) виконується перехід до наступної ключової точки;
- 8) алгоритм повторюється від кроку б.

Визначення компоненту освітленості виконується в залежності від типу поточної точки. Якщо поточна точка – джерело світла, тоді використовуються формули, що відповідають розповсюдженню від джерела світла. Якщо поточна точка – будь-яка з ключових точок, тоді, у відповідності до визначених видів BTDF та BRDF, а також до усіх вхідних компонентів освітленості поточної точки, визначається частина світла, що напрямлена до ключової точки, відповідно до чого визначається наступний компонент освітленості.

Окрім трасування кожного окремого променя варто виконувати загальний контроль над проходженням загальної операції. Таким чином можна визначити той момент, коли максимальна зафіксована зміна будь-якого компонента освітленості за певне число останніх трасувань була меншою від

очікуваного рівня достовірності, що буде достатнім фактором для завершення виконання усіх трасувань і початку аналізу результатів.

Також допускається зупинка усіх трасувань після певної загальної кількості трасувань, або за загальним часом виконання роботи. Однак дані підходи можуть зменшити результуючу достовірність побудованої моделі.

2.2.2 Збір результатів і підготовка текстур освітлення

Збір результатів виконується у декілька етапів.

У першу чергу виділяються групи ключових точок, відносно яких будуються окремі процедурні текстури освітлення. Дані групи можуть бути сформовані відносно окремих об'єктів, груп об'єктів, або навіть усього віртуального простору. Для простоти, у якості обмеження для кожної окремої групи буде використовуватись паралелепіпед, кожна з граней якого є перпендикулярною до однією з вісей координат.

Одна ключова точка може належати до декількох груп ключових точок одночасно. Усі операції над ключовими точками, що можуть змінити їх стан, виконуються незалежно від їх належності певним групам.

Для початку, усі ключові точки, що не увійшли до жодної з груп, видаляються. У подальшому розгляді вони приймати участь не будуть.

Для кожної ключової точки, що лишилась, з-поміж усіх вхідних світлових променів, що були розраховані на етапі трасування, визначається значення мінімальної інтенсивності.

Визначене значення буде використовуватись у якості компоненту «мінімального значення освітлення з усіх напрямків для визначення оточуючого освітлення».

Надалі, з-поміж усіх напрямків освітлення, визначається певне число домінантних напрямків освітлення.

Дані значення використовуватимуться у якості компоненту «домінантні напрямки освітлення для визначення інформації про відблиск».

Усі напрямки освітлення, що не були визначені як домінантні, усереднюються. У результаті даної операції, певне число вхідних світлових променів перетворюється на значення єдиного вхідного променя світла.

Розраховане значення буде використовуватись у якості компоненту «усереднене значення освітлення з усіх напрямків для визначення розсіянного освітлення».

У результаті усіх вищеназваних операцій були отримані певні групи ключових точок, для кожної з яких визначені певні набори значень, що є очікуваними для подальшого використання під час візуалізації моделі освітлення. Відповідно до того, що кількість точок від самого початку є кінцева, кожна з даних точок відповідає за певну частину від загального простору, що відповідає обмеженню встановленому групою точок.

Кожну з ключових точок простору вважаємо рівноправною. Відповідно до цього, для будь-якої точки віртуального тривимірного простору, з-поміж усіх ключових точок для виконання розрахунку буде обиратись одна, відстань до якої є найменшою. Множина усіх точок, для якої була обрана певна ключова точка для виконання розрахунку, є підпростором ключової точки.

Варто відмітити, що у результаті визначення усіх підпросторів будь-яка з точок простору, що відповідає простору обмеження групи ключових точок, буде належати певному і лише одному підпростору. Кожен з таких підпросторів буде нерозривним випуклим багатогранником, що буде торкатись певного числа інших.

Існує велика ймовірність того, що у певних ключових точок, підпростори яких дотикаються один до одного, компоненти освітлення будуть або відповідати один одному, або різниця між ними буде достатньо малою у порівнянні з рівнем деталізації сучасних екранів, щоб нею можна було знехтувати. У даному випадку можна виконати об'єднання двох суміжних підпросторів. У результаті отримаємо новий підпростір, що буде включати в себе два об'єднані підпростори, а також характеризуватиметься новою

ключовою точкою, яка за своїми характеристиками буде рівна усередненому значенню двох окремих ключових точок, підпростори яких були об'єднані.

Враховуючи те, що у результаті об'єднання двох підпросторів інформація про спільні грані двох об'єднаних підпросторів не матиме впливу на подальше визначення належності точки певному підпростору, вона може бути видалена. Аналогічно, збереження інформації про компоненти освітлення двох окремих початкових ключових точок замінюються описом однієї результуючої ключової точки. Отже, даний підхід дозволяє зменшити витрати відеопам'яті для збереження однієї окремої текстури. Окрім того, при визначенні ключової точки, якій відноситься певна точка у віртуальному тривимірному просторі, необхідно буде виконати пошук по меншому числу підпросторів. Тобто, очікується зменшення часу, необхідного для виконання розрахунку освітленості у одній точці тривимірного простору.

Можливим є випадок, коли для певних пристроїв отримана результуюча модель буде займати забагато місця, або вимагатиме більший об'єм часу, ніж може бути виділений для відображення окремої точки віртуального тривимірного простору під час візуалізації відповідно до вказаних вимог. У даному випадку можна виконати додаткове об'єднання підпросторів, у результаті чого отримаємо модель, що займатиме менше місця та вимагатиме меншого об'єму часу для виконання відповідних розрахунків. Однак, додаткові об'єднання будуть виконуватись лише тоді, коли виконати об'єднання з урахуванням вимог щодо збереження певного рівня достовірності вже не буде можливим. Тобто, подальше спрощення моделі буде супроводжуватиметься втратами якості. Щоб мінімізувати втрати, необхідно буде першочергово виконувати об'єднання тих суміжних пар ключових точок, для яких значення відхилення середнього значення від початкових буде мінімальним з-поміж усіх можливих суміжних пар ключових точок, наявних на даному етапі.

Як відомо, множина точок, кожна з яких є однаково віддаленою від двох точок, що не співпадають, є площиною, що перпендикулярна до відрізка, що поєднує ці дві точки, та проходить через центр даного відрізка. По кожному зі

сторін даної площини знаходяться точки, що є ближчими до тієї точки, що знаходиться у відповідному півпросторі. Відповідно до цього, геометричне місце точок, що знаходяться найближче до певної ключової точки, обмежене аналогічно побудованими площинами для усіх можливих пар ключових точок з поточною ключовою точкою.

Обмеження, сформовані усіма даними площинами, у результаті формують певний випуклий багатогранник. Важливо помітити, що можливі ситуації, коли при вилученні певних площин, результуюче геометричне місце точок залишиться незмінним. Такими площинами можна нехтувати. Окрім того – кожна виключена з розгляду площина результує у зменшенні загальної кількості перевірок, тобто, зменшує час, необхідний для виконання загальної перевірки. Відповідно до цього, з метою виконання вимог щодо обмежень часу, витраченого на розрахунок, дані площини необхідно виключати з розгляду.

Результуючі отримані площини, що обмежують окремі півпростори, розповсюджуються і поза межами відповідних півпросторів. Відповідно до цього, кожна з таких площин може розділяти загальний простір, яким обмежується група ключових точок. Відповідно до цього можна стверджувати, що для кожного з підпросторів виконується одна з трьох умов:

- підпростір знаходиться по один бік від площини;
- підпростір знаходиться по інший бік від площини;
- підпростір знаходиться по обидва боки від площини (перетинається з нею).

Розглянемо одну з відповідних площин. Припустимо, відносно неї була виконана перевірка належності точки підпростору. У результаті було отримане значення – по який з боків знаходиться перевірювана точка, тобто у якому з півпросторів (належність площині будемо вважати віднесенням до одного з півпросторів). Помітимо, що коли певний підпростір знаходиться по один бік від площини, то всі точки, що належать даному підпростору, знаходяться по цей бік площини. Коли певна точка знаходиться по інший бік площини – розглядуваному підпростору належати вона не може. Тобто, шляхом перевірки

належності точки певному півпростору, була дана однозначно негативна відповідь на належність точки певному числу підпросторів. Повторні перевірки належності точки даним підпросторам не принесуть нової інформації, тому можуть бути пропущені.

Таким чином, з-поміж усіх площин, можна виділити таку площину, для якої сумарна кількість підпросторів, що цілком і повністю знаходяться по якийсь бік від площини, що розглядається, є максимальною, а різниця між кількостями підпросторів по кожену зі сторін площини відповідно, є мінімальною. Максимальна сумарна кількість підпросторів, що цілком і повністю знаходяться по якийсь бік від площини означає мінімальну кількість підпросторів, що даною площиною діляться навпіл, тобто входять до обидвох сторін одночасно. Зменшенням кількості підпросторів, що належать обидвом півпросторам одночасно, ми одночасно зменшуємо з обидвох боків кількість підпросторів, які необхідно буде перевірити. Мінімізацією різниці між кількістю підпросторів по кожен з боків площини ми досягаємо максимально наближеної кількості підпросторів, що необхідно буде перевірити на наступному кроці перевірки. У разі, коли з одного боку площини буде знаходитись більше число підпросторів, то при перевірці даного півпростору необхідно буде виконати більшу кількість перевірок, ніж для іншого півпростору, що збільшує очікуваний час виконання розрахунку освітлення за даною моделлю.

Після виконання даного розділення простору, обмеженого групою ключових точок, на два півпростори, для кожного з них виконуємо аналогічні операції. Таким чином ми приводимо загальну складність пошуку необхідного підпростору до логарифмічного вигляду, замість лінійної перевірки кожного з просторів окремо.

Відповідно до всього цього будується алгоритм визначення значень компонентів освітленості для певних точок простору. Сам алгоритм має вигляд почергової перевірки належності точки певному півпростору відносно чергової площини, у результаті чого чи визначається наступний півпростір для

подальшого пошуку, чи однозначно визначається шуканий підпростір, відповідно до якого отримуємо значення шуканих компонентів освітленості.

2.2.3 Використання текстури освітлення

У результаті попередньо описаних дій ми отримали певну процедурну текстуру, що в залежності від певної координатної текстурної точки поверне значення компонентів освітленості:

- домінантні напрямки освітлення для визначення інформації про відблиск;
- мінімальне значення освітлення з усіх напрямків для визначення оточуючого освітлення;
- усереднене значення освітлення з усіх напрямків для визначення розсіяного освітлення.

Отримані значення будуть використані для визначення значення освітленості відповідно до моделі затінення по Фонгу.

$$I_p = k_a i_a + \sum_{m \in \text{lights}} (k_d (L_m^\wedge \cdot \hat{N}) i_{m,d} + k_s (R_m^\wedge \cdot \hat{V})^\alpha i_{m,s}) \quad (2.7)$$

Помітимо, що для деяких компонентів моделі Фонга сформована текстура повертає декілька значень. Кожне з цих значень має бути використане у моделі Фонга окремо, результуючи у більш достовірному результаті.

Важливим є раціональне використання сформованих текстур. Таким чином, коли певна текстура була сформована лише для певного об'єкту у віртуальному тривимірному просторі, то вона має бути використана лише для цього самого об'єкту, і при розрахунку освітлення для інших об'єктів дана текстура не має розглядатись зовсім. Таким чином буде зменшена кількість виконаних операцій під час виконання візуалізації одного кадру, а отже і буде зменшений час, що буде витрачений на підготовку одного кадру.

2.2.4 Висновки щодо побудованої моделі

Модель освітлення цілком і повністю будується у відповідності до віртуального тривимірного простору, розміщення джерел світла та об'єктів у ньому, а також визначених матеріалів.

Відповідно до визначеної раніше моделі розповсюдження світла, визначається певна його частина, що потрапляє на поверхні об'єктів у віртуальному тривимірному просторі, а саме у певних визначених ключових точках. Відповідно до визначених компонент освітленості у кожній з ключових точок визначається набір необхідних для виконання розрахунку результуючого освітлення значень.

Отримані моделі можуть бути не оптимальними, у відповідності до чого виконується ряд певних операцій, у результаті яких зменшується кількість ключових точок розрахунку освітленості без втрат, що можуть бути помічені на екрані для перегляду результатів візуалізації. У випадку, коли отримані моделі не відповідають вимогам для використання на певних технічних засобах візуалізації, дані моделі можуть бути спрощені з додатковою втратою результуючої достовірності.

Сформована модель освітлення використовується разом з моделлю затінення Фонга. Таким чином, за моделлю освітлення визначаються набори компонент, які є необхідними для виконання розрахунків у моделі затінення Фонга. У результаті обох розрахунків визначається результуюче значення освітленості окремої точки простору.

Помітимо, що процес використання моделі освітлення є незалежним від процесу її побудови. Відповідно, дана модель може бути побудована окремо, незалежно від активного процесу візуалізації, а потім бути використана під час самого процесу візуалізації. Тобто, дана модель освітлення може бути оптимізована методом попереднього розрахунку освітлення, що дозволяє отримати більш достовірну результуючу модель освітлення без додаткових

витрат часу на кожен окремий кадр візуалізації віртуального тривимірного простору.

2.3 Моделювання динамічного освітлення

Динамічне освітлення, на відміну від статичного, не може бути повністю розрахованим завчасно. Відповідно до цього, під час візуалізації кожного окремого кадру необхідно виконувати додаткові розрахунки, що вимагають додаткового процесорного часу. У випадку, коли апаратні засоби не дозволяють цей додатковий час виділити, моделювання динамічного освітлення може бути опущене, на відміну від статичного. Статичне освітлення має бути відображене у будь-якому випадку для формування мінімального зображення.

2.3.1 Джерела світла зі зміною інтенсивності у часі

Певні джерела світла можуть змінювати свою інтенсивність у часі. Таким чином, значення інтенсивності випромінюваного джерелом світла може залежати як від певного зовнішнього значення, так і від часу, що пройшло від початку симуляції тривимірного віртуального простору.

$$i_{m,d} = f_{m,d}^i(t) \quad (2.8)$$

Помітимо, що процедурні текстури, що використовуються у моделі освітлення віртуального тривимірного простору, можуть залежати від певних додаткових змінних. При цьому значення часу, що пройшов від початку симуляції тривимірного віртуального простору, або певне інше зовнішнє значення, можуть бути використані у якості таких змінних. Відповідно до значень таких змінних, вихідні значення процедурної текстури, що використовуються під час розрахунку результуючої освітленості окремих точок віртуального тривимірного простору, можуть бути відповідно скореговані. Таким чином, формат процедурних текстур може бути використаний для збереження інформації про освітлення, у формуванні якого беруть участь джерела світла зі зміною інтенсивності у часі.

Відповідно до того, що змінюється інтенсивність джерела світла, змінюються також і значення інтенсивностей кожного зі світлових променів,

що беруть початок у відповідному джерелі освітлення. Інформація про інтенсивності променів освітлення визначається на етапі трасування променів. Тому, для можливості розрахунку результуючого значення інтенсивності освітлення певної точки віртуального тривимірного простору в залежності від інтенсивності початкового джерела освітлення, необхідно зберігати залежність між інтенсивністю кожного з трасованих променів від інтенсивності джерела освітлення. Таким чином, тепер кожен зі світлових променів характеризується не тільки розрахованою інтенсивністю від статичних джерел освітлення, але також включає в себе змінну частину, що відповідає тій частині світла, що надійшла від джерела світла зі зміною інтенсивності у часі.

$$I_p = k_a i_a + \sum_{m \in lights} \left(k_d (L_m^\wedge \cdot \hat{N}) f_{m,d}^i(t) + k_s (R_m^\wedge \cdot \hat{V})^\alpha f_{m,s}^i(t) \right) \quad (2.9)$$

Можливим є випадок, коли складова частина від джерел світла зі зміною інтенсивності у часі, з урахуванням можливого максимального значення інтенсивності джерела світла, є порівняно малою. Тобто є такою, що нею можна знехтувати. У такому випадку, частину, що залежить від інтенсивності джерела світла, що може змінюватись у часі, можна відкинути, тим самим зменшивши алгоритмічну складність певних частин результуючої процедурної текстури.

Помітимо, що джерел, що можуть змінювати свою інтенсивність у часі, може бути декілька. У такому випадку, частина інтенсивності кожного з джерел освітлення зі зміною інтенсивності у часі розраховується окремо і вважається окремою компонентою.

Зміні також піддається і етап визначення окремих компонентів світла, на основі яких визначається результуюче значення освітленості окремих точок віртуального тривимірного простору.

Значення мінімальної інтенсивності визначається з урахуванням мінімально можливих значень інтенсивностей джерел світла зі зміною інтенсивності у часі.

Визначення домінантних напрямків надходження світла відбувається у два кроки.

На початку, у якості домінантних напрямків світла обираються ті вхідні напрямки світла, для яких є найбільшим значення інтенсивності світла з урахуванням максимально можливих значень інтенсивностей джерел світла зі зміною інтенсивності у часі. Дані домінантні напрямки упорядковуються за визначеними значеннями інтенсивностей світла.

На другому кроці, для кожного з напрямків світла у ключовій точці, визначається інтенсивність світла з урахуванням мінімально можливих значень інтенсивностей джерел світла зі зміною інтенсивності у часі. За результатами розрахунків визначається кількість таких пар, у яких інтенсивність домінантного напрямку світла є меншою за інтенсивність не домінантного напрямку світла. При чому, кожен окремий напрямок світла може входити не більше ніж у одну описану пару. У випадках, коли кількість подібних пар перевищує нуль, виконується заміна частини останніх домінантних напрямків на не домінантні, що були визначені у відповідних парах. При цьому, кількість замінюваних елементів не може перевищувати певного значення. Якщо кількість визначених пар перевищує встановлений ліміт, з-поміж визначених не домінантних напрямків світла обираються ті, для яких визначена інтенсивність з урахуванням мінімально можливих значень інтенсивностей джерел світла зі зміною інтенсивності у часі є максимальною.

Отриманий набір напрямків освітлення використовуватиметься у якості «домінантних напрямків освітлення для визначення інформації про відблиск».

Усі напрямки світла, що не були визначені як домінантні, усереднюються та утворюють компонент «усереднене значення освітлення з усіх напрямків для визначення розсіяного освітлення».

При цьому, змінні частини, що визначені для кожного з напрямків світла, не опускаються.

Описані вище значення зберігаються у результуючій процедурній текстурі та використовуються під час визначення освітленості кожної з окремих точок тривимірного віртуального простору.

Помітимо, що значення інтенсивностей джерел світла зі зміною інтенсивності у часі, під час візуалізації одного кадру не змінюються. Таким чином дані значення можуть бути розраховані лише один раз на кадр. Отримані значення можуть бути використані у кожній з окремих процедурних текстур без необхідності повторного розрахунку.

2.3.2 Освітлення динамічних об'єктів

У розділі 1.4.1 був розглянутий один з підходів до динамічного розрахунку освітлення, що використовується у Unreal Engine. Його суть полягає у формуванні певної тривимірної сітки у просторі, у якому можуть знаходитись динамічні тривимірні об'єкти. Для кожного з вузлів даної сітки на підготовчому етапі визначаються характеристики світлових потоків. На етапі фінальної візуалізації, коли у дану сітку потрапляє певний динамічний об'єкт, для кожної з точок поверхні даного об'єкту можна визначити окремий вузол у сітці таким чином, що відстань між ними буде мінімально-можливою. Інформацію про освітлення з відповідного вузлу сітки застосовують до точки поверхні об'єкту, у результаті чого, з виконанням розрахунків у відповідній моделі освітлення, отримуємо результуюче значення освітленості точки простору.

Аналогічний підхід можна перекласти і на процедурні текстури. Однак, коли для поверхонь тіл можна було використовувати двовимірні текстури, то для простору необхідно буде використати тривимірний аналог. Дана текстура повертатиме аналогічний набір даних для подальшого використання у моделі освітлення Фонга.

Для впровадження даного підходу, ще до етапу попереднього розрахунку, необхідно виділити відповідні простори тривимірної сцени, у яких зможуть знаходитись динамічні тривимірні об'єкти. Кожен з даних просторів має мати вигляд паралелепіпеду, кожне з ребер якого має бути паралельним до однієї з

вісєй координат. Для будь-якого об'єкту, що потрапить у даний простір, можна буде визначити його освітленість. Однак, коли об'єкт вийде за межі усіх даних просторів – його освітленість даним підходом визначити не вийде.

Для кожного з даних просторів формується відповідна однорідна сітка відповідно до заданих користувачем характеристик щільності. Чим більшою буде задана щільність – тим точнішим буде результат розрахунку динамічних тіней. Однак і тим більшим буде об'єм інформації, необхідний для збереження.

Для кожного з вузлів розрахунок освітлення виконується аналогічно з розрахунком освітлення для ключових точок поверхонь статичних об'єктів. Однак, так як дані точки не можуть відбивати чи заломлювати світло, єдиним можливим напрямком розповсюдження світла після даної точки є напрямок потрапляння у неї. З використанням підходу PathTracing, розповсюдженням освітлення після вузлу тривимірної сітки можна нехтувати. Так як даний підхід покладається на випадкове розповсюдження світла у всьому просторі – ймовірність потрапляння даного світлового променю у даний вузол, чи у точку поверхні статичного об'єкту за нею, є однаковою, і на великій вибірці будуть розраховані обидві ситуації.

Після виконання розрахунків для кожного з вузлів сітки, можна повторити операції оптимізації, що були описані вище для основного розрахунку освітлення. Тобто – визначити суміжні вузли, різниця у освітленні між якими не перевищує значення допустимої похибки, та об'єднати їх у єдиний вузол.

2.3.3 Розрахунок тіней від динамічних об'єктів

Під час попереднього моделювання освітлення виконується розрахунок розповсюдження статичної частини світла. Так як місцеположення та форма об'єктів, а також джерела світла та їх інтенсивність, не змінюються у часі, то уся розрахована інформація про поточний стан освітлення віртуального простору залишається актуальною. Однак, коли у дану систему потрапляє динамічний об'єкт, він може не лише залишитись не освітленим, але і

перекрити деякі шляхи розповсюдження освітлення, на основі яких був виконаний розрахунок на попередньому етапі.

Модель розповсюдження світла є складною системою. Один перекритий промінь світла може, через череду заломлень та відбиттів, розділитись на незліченну кількість нових променів світла. Розрахунок даної ситуації освітлення є алгоритмічно-складним, тому і не буде виконаний у повній мірі. Однак, можна виконати розрахунок для основної частини розрахованого освітлення – домінантних напрямків розповсюдження, які були виділені на поверхнях тривимірних об'єктів.

Таким чином, для визначення необхідності затінення певної точки об'єкту, достатньо перевірити відповідні домінантні напрямки надходження освітлення на перетин з динамічним об'єктом. Якщо буде визначено, що певна кількість домінантних напрямків була перекрита, достатньо буде їх виключити з розрахунку результуючого освітлення розглядуваної точки. Таким чином під час розрахунку освітленості відповідної точки поверхні тривимірного об'єкту буде використана лише частина світла, що надходить за нормальних умов, а інша буде віднята у якості тіні.

Так як об'єкт, що може кинути тінь, може бути геометрично складним – перевіряти перетин кожного з домінантних напрямків з кожним полігоном динамічного об'єкту може бути не вигідно у плані витрат часу. Замість цього динамічний об'єкт можна спростити. Одним з варіантів спрощення є використання обмежувальних фігур – певних геометричних примітивів (сфер, паралелепіпедів, циліндрів, тощо), що містять у собі увесь динамічний об'єкт, або його частину. Таким чином достатньо буде перевірити перетин кожного з домінантних напрямків з певним числом даних обмежувальних фігур, кожна з яких замінює собою певне число полігонів.

Варто помітити, що розраховувати інформацію про подібні динамічні затінення має сенс лише для видимої частини віртуального простору. Так як під час візуалізації є інформація про кожну з точок простору, яку спостерігає у даний момент користувач, можна виконати розрахунок затінення лише для

даної підмножини. Таким чином буде використана оптимізація, що була описана раніше у роботі.

2.3.4 Висновки до моделювання динамічного освітлення

Динамічне освітлення, на відміну від статичного, вимагає виконання розрахунків під час візуалізації у режимі реального часу. Однак, частину даних розрахунків можна виконати попередньо, і тим самим спростити виконання фінальних розрахунків освітленості.

Розроблена модель освітленості статичних об'єктів може бути модифікована, у результаті чого вона зможе працювати з джерелами освітлення, інтенсивність яких змінюється у часі. Такий підхід може надати більш достовірне зображення, у порівнянні з класичними підходами динамічного освітлення, так як у ньому враховується інформація про відбиття світла від інших статичних об'єктів.

Також модифікація розрахунку освітлення може бути використана для визначення освітленості у певній тривимірній сітці простору. За допомогою даних розрахунків можна буде виконати розрахунок освітленості для динамічного об'єкту, що потрапить у відповідний простір.

Окрім того, з виконанням додаткових оптимізацій опису динамічних тіл, можливим є визначення інформації про затінення з використанням наявної інформації про освітленість видимої частини простору. Так як відомо, з яких напрямків і яка частина світла потрапляє у відповідні точки простору, можливим є визначення перекриття даних шляхів розповсюдження динамічними об'єктами. У разі визначеного перекриття, відповідна частина світла не надходить до очікуваної точки простору, а отже віднімається від результуючої картини.

Таким чином, з певним числом модифікацій, підхід до розрахунку освітлення з використанням процедурних текстур може бути використаний для визначення освітлення у просторі з динамічними об'єктами, що можуть відкидати тінь, та за умов змінюваної інтенсивності джерел світла.

2.4 Висновки до розділу

Для моделювання освітлення у віртуальному тривимірному просторі використовується окрема математична модель, що базується на розділі фізики – оптиці. У даній моделі описаними є різновиди джерел освітлення разом з відповідними характеристиками вихідних світлових променів. З-поміж усіх моделей розрахунку розповсюдження світла була обрана модель освітлення Фонга, що враховує явища розсіювання та відбиття світла поверхнею тіла, а також дозволяє врахувати явище випромінювання світла тілом.

Відповідно до обраної математичної моделі була побудована модель розрахунку освітлення на основі процедурних текстур. До даної моделі увійшли правила трасування світлових променів від джерел світла до поверхонь віртуальних об'єктів, обробка та збір до процедурних текстур результатів трасування, а також використання сформованих процедурних текстур під час візуалізації віртуального тривимірного простору.

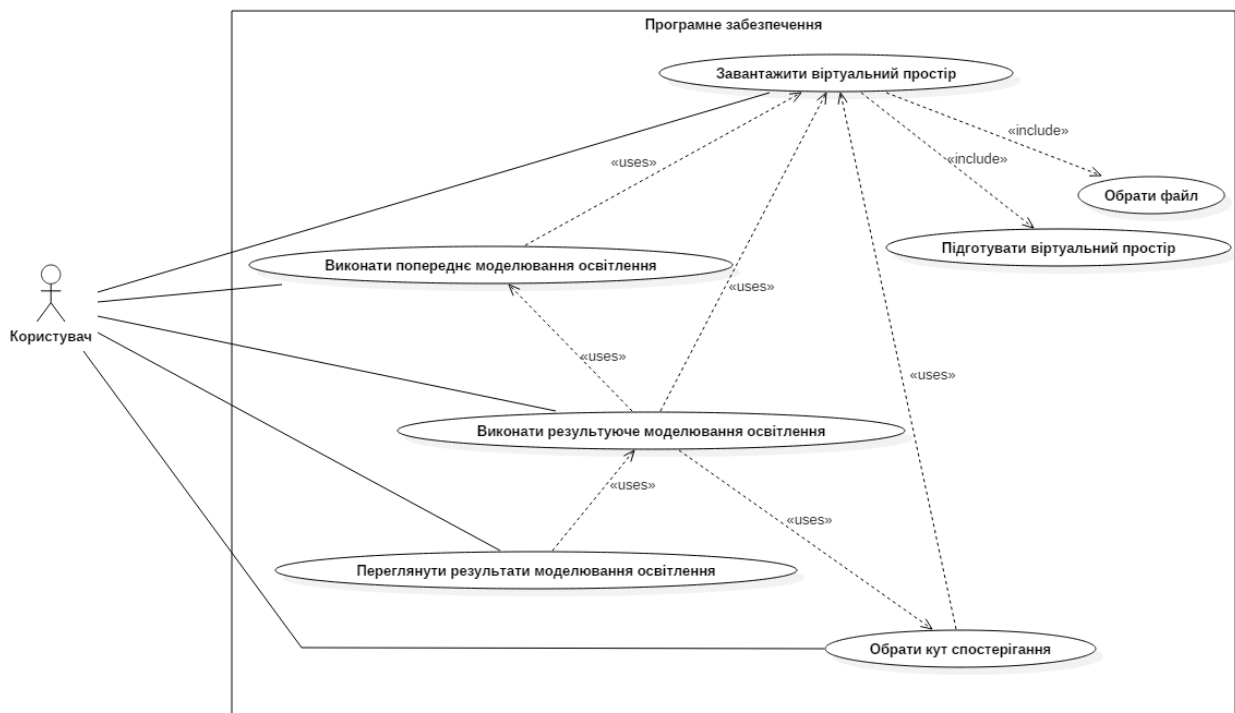
Також були відзначені можливості розширення даної моделі для розрахунків освітлення у змінюваному середовищі. Так були відмічені можливості розрахунку освітлення для джерел, що можуть змінювати свою інтенсивність протягом часу, а також освітлення поверхонь динамічних тіл та розрахунок тіней від них, що не може бути виконане на етапі попереднього розрахунку моделі освітлення віртуального тривимірного простору.

3 АРХІТЕКТУРА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

3.1 Загальний огляд програмного забезпечення

Основна задача розроблюваного програмного забезпечення – моделювання освітлення у віртуальному тривимірному просторі.

Як було описано вище, процес моделювання освітлення поділений на дві частини – етап попереднього моделювання, на якому виконуються усі попередні розрахунки, а також основний етап, на якому відбувається основний процес розрахунку фінального значення освітлення тривимірного простору. Окрім того, усі дані операції виконуються у певному тривимірному просторі, який має мати своє представлення, а також має бути заданий користувачем до початку виконання розрахунків.



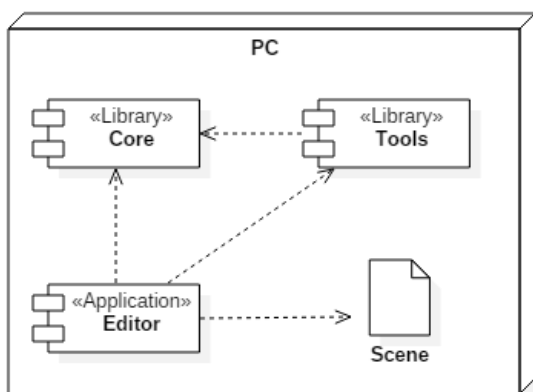
- підготовка світлових карт для відповідних методів освітлення;
- обрати кут спостереження:
 - змінити місцеположення віртуального спостерігача (камери);
- виконати результуюче моделювання освітлення:
 - виконати растеризацію видимої частини простору;

- відобразити результати моделювання освітлення.

У якості середовища для роботи з програмним продуктом будуть використані персональні комп'ютери. Таким чином увесь інтерфейс може бути побудований з використанням загальних компонентів. Окрім того, сучасні персональні комп'ютери можуть мати декілька розрахункових ядер, що може бути використане для пришвидшення процесу попереднього етапу моделювання освітлення.

З метою підвищення зручності, користувацький інтерфейс має бути графічним, з використанням стандартних методів введення – клавіатури та комп'ютерної миші.

Помітимо, що центральна частина функціоналу, яка відповідає за основне представлення тривимірного простору та розрахунки у ньому, може бути виділена окремо. Також можна виділити додатково ту частину програмного продукту, яка може бути використана іншими програмними застосунками, але не використовується безпосередньо у основному процесі моделювання освітлення. Таким чином дані частини можна буде використати повторно у інших програмних продуктах.



Діаграма розгортання

розгортання складається з наступних частин:

графічного інтерфейсу для роботи з системою
тривимірному просторі;

центральному компоненту з описами
у, а також усіх операцій над ним та

освітленням у ньому;

- бібліотеки Tools – компоненту з додатковим функціоналом, що використовується застосунком Editor, та не є необхідним для функціоналу компоненту Core.

Для розробки програмного забезпечення була обрана платформа .Net, та мова програмування C#.

3.2 Центральний компонент Core

У даному компоненті реалізуються наступні частини розроблюваного програмного забезпечення:

- опис структури віртуального тривимірного простору;
- механізми підготовки віртуального тривимірного простору перед початком роботи з ним;
- механізми збереження (серіалізації) та завантаження (десеріалізації) віртуального тривимірного простору;
- механізми трасування віртуального тривимірного простору;
- механізми розрахунку розповсюдження світла у віртуальному тривимірному просторі;
- механізми растеризації віртуального тривимірного простору;

Даний компонент є окремою бібліотекою, що може бути підключена до будь-якого проекту, написаного для платформи .Net.

3.2.1 Структура віртуального тривимірного простору

У основі всіх операцій та структур даних віртуального тривимірного простору лежить поняття математичний вектор. За допомогою даної структури задаються координати окремих точок, інформація про напрямок розповсюдження світла та характеристики кольору світла.

Для координат, над якими необхідно буде виконувати операції перетворення, будемо використовувати однорідну систему координат. Операції переміщення та проєціювання у даному просторі можна задати за допомогою єдиних матриць, у той час як у Декартовій системі координат для переміщення необхідно вводити додатковий вектор (Афінні перетворення), або додатковий математичний апарат для визначення спроектованих у простір екрану координат.

Як було відзначено вище, для виконання перетворень можуть бути використані математичні матриці. За допомогою них можна виконати усі необхідні перетворення геометричного простору: повороти навколо осей,

переміщення, масштаб. Також можна вивести матриці перетворень для виконання ортогографічного чи перспективного проєціювання, які будуть корисні на етапі растеризації тривимірного простору.

Таким чином, у основі усіх основних операцій будуть лежати дві структури: вектор та матриця, а також операції над ними. Вектор буде представлений класом `Vector`, а матриця – класом `Matrix`. Окремі операції (наприклад: скалярний добуток, векторний добуток) винесені у окремий клас `F`.

Перетворення, за допомогою яких буде модифікуватись віртуальний тривимірний простір, генеруватимуться за допомогою класу `Transform`. Даний клас, відповідно до вхідних параметрів, генеруватиме наступні перетворення:

- переміщення (3.1);
- масштаб (3.2);
- поворот навколо осі X (3.3);
- поворот навколо осі Y (3.4);
- поворот навколо осі Z (3.5);
- ортогографічна проєкція (3.6);
- перспективна проєкція (3.7).

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ x & y & z & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$\begin{bmatrix} x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & \sin(\alpha) & 0 \\ 0 & -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$\begin{bmatrix} \cos(\alpha) & 0 & -\sin(\alpha) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin(\alpha) & 0 & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$\begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) & 0 & 0 \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{2}{r-l} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2}{t-b} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{f-n} & 0 \\ \frac{l+r}{l-r} & \frac{b+t}{b-t} & \frac{n}{n-f} & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{2 \cdot p}{r-l} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2 \cdot p}{t-b} & 0 & 0 \\ \frac{l+r}{l-r} & \frac{b+t}{b-t} & \frac{f}{f-n} & 1 \\ 0 & 0 & \frac{n \cdot f}{n-f} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Помітимо, що кожне з даних перетворень є транспонованим. Таким чином усі операції перетворення у операціях матричного добутку будуть перераховані зліва направо.

Виділимо частину віртуального тривимірного простору, у просторі якої будемо виконувати моделювання освітлення. Дана частина простору має назву сцена, та представлена у програмному забезпеченні класом Scene.

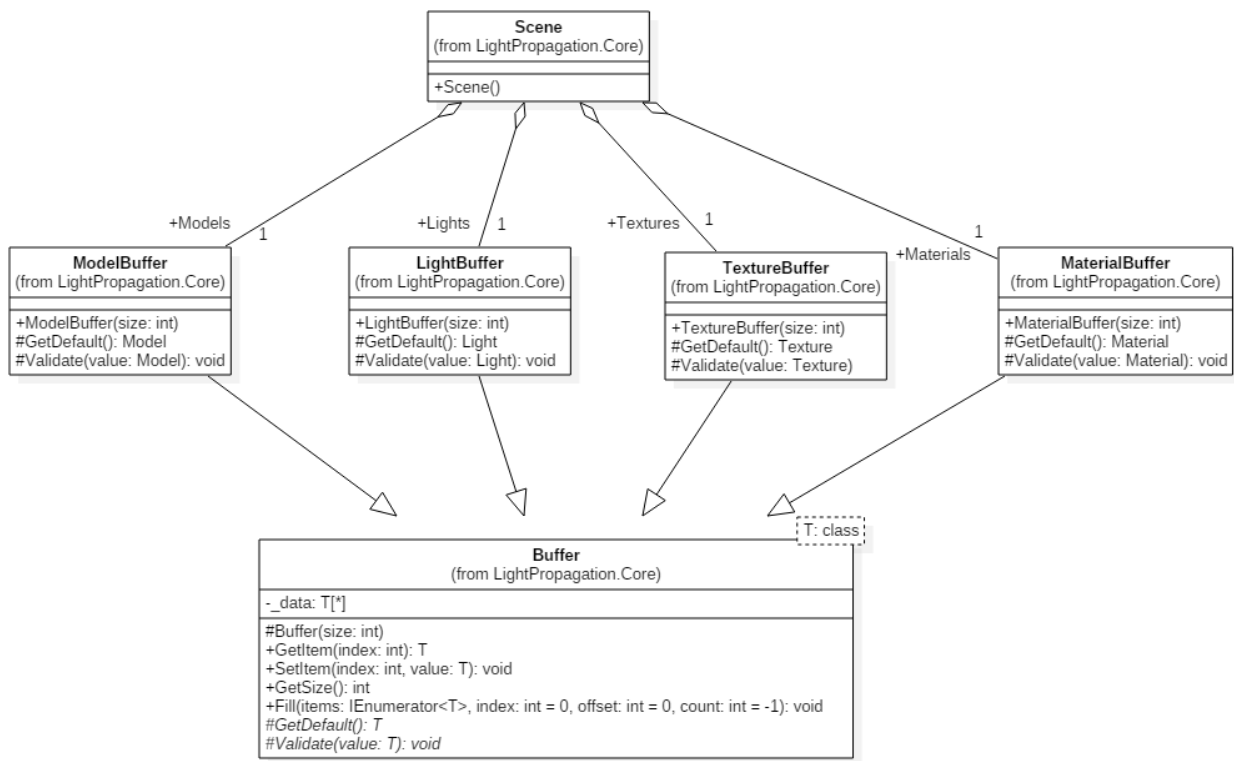
До даної сцени входить деяка множина тривимірних об'єктів – моделей, кожен з яких представлений екземпляром класу Model. Дана множина тривимірних об'єктів освітлюється певним числом джерел освітлення, які представлені екземплярами класів Light.

Кожна з моделей так чи інакше поводить себе у світлі. Одні об'єкти можуть зовсім не відображати світло, у той час як інші можуть бути абсолютно дзеркальними. Інформація про характер взаємодії поверхні тіла зі світлом зберігається у матеріалі моделі. Помітимо, що декілька окремих моделей

можуть використовувати один і той же матеріал для опису своїх характеристик. Відповідно до цього оптимальним підходом буде винести інформацію про матеріали на рівень окремої сцени, а з кожної окремої моделі посилатись на відповідний матеріал.

Для деталізації поверхонь використовуються текстури. Вони, певним чином, співвідносяться з поверхнею моделі та надалі використовуються під час розрахунку освітлення. Текстури, як і матеріали, можуть бути використані для декількох моделей одночасно.

Кожна з описаних складових являє собою масив даних певного типу. Важливо помітити, що елементи даних масивів не можуть бути порожніми (значення не може бути рівним null). Стандартні конструкції масивів не розраховані на виконання подібних перевірок. Через це для збереження відповідної інформації введемо окрему структуру даних: Buffer, у основу якої введемо необхідні перевірки, а також вирішення ситуацій коли певний елемент масиву вказаний не буде.



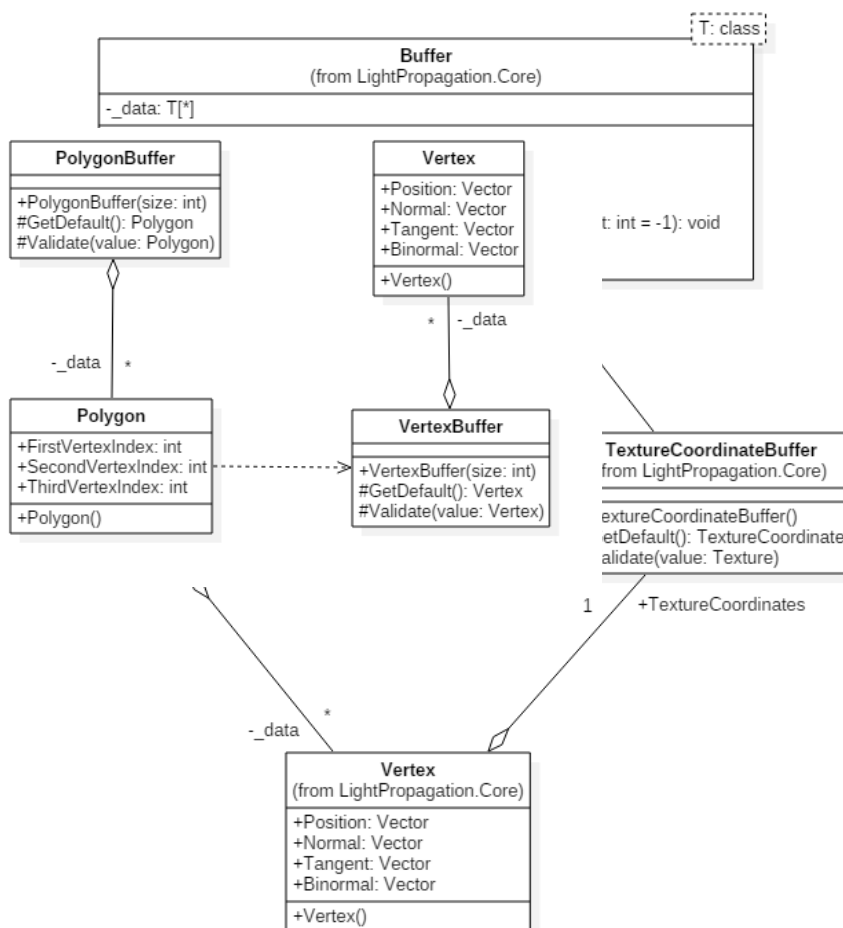
тривимірному тілі.

Рисунок 3.4 – Приклад полігональної сітки

Кожна вершина тіла певним чином співвідноситься з текстурними координатами. Таким чином – кожен полігон відповідає певному трикутнику на відповідних текстурах. Помітимо, що кожен полігон може використовувати декілька текстурних шарів. Наприклад: окремий шар первинного кольору, та додатковий шар з інформацією про тіні. Відповідно, кожен окрема вершина може містити у собі інформацію про декілька текстурних координат. Для даної системи можна обмежити кількість до 8 текстурних координат. За необхідності даний ліміт можна буде підняти у майбутньому.

Кожна з вершин зберігатиметься, подібно до моделей, у відповідному буфері, що буде контролювати наявність порожніх значень та ініціалізувати нові екземпляри стандартними значеннями.

Інформація про полігони, при цьому, включає в себе лише інформацію про індекси відповідних вершин. Інформація про будь-яку з точок полігону, що не відповідає вершинам, визначається шляхом інтерполяції по даному полігону. Полігонів для однієї моделі може бути декілька, тому вони будуть збережені у відповідному буфері.



про вершини

про полігони

зі координати, але різну
м, під час модифікації
бути повторити дану
ю.

ин, може знадобитись
ка відповідає декільком
і і для усіх точок, що

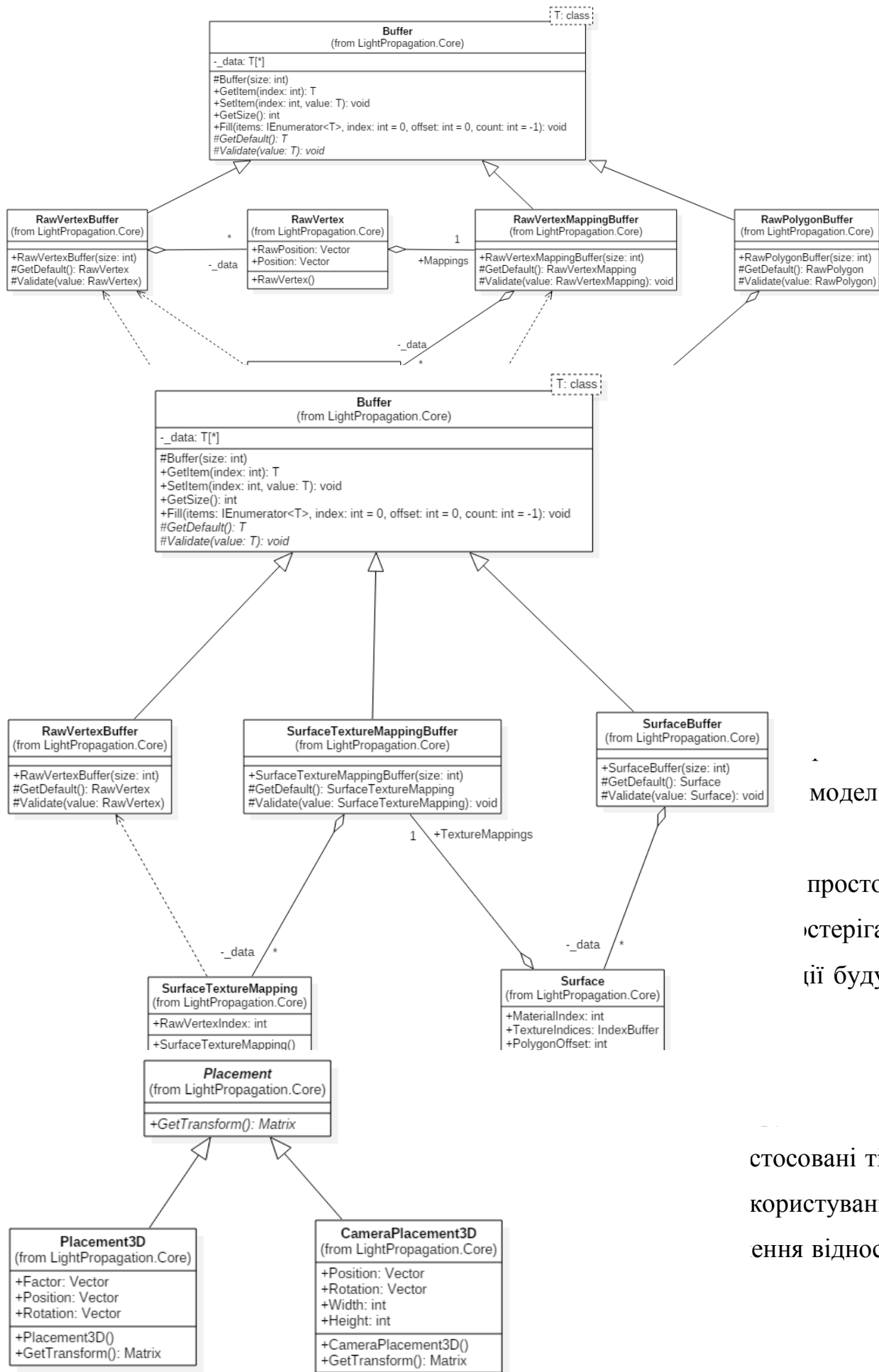
Відповідно до цього, оптимальнішим підходом буде введення вершин прототипів, на основі яких буде розраховуватись інформація окремих вершин. Таким чином – коли положення та нормаль будуть обраховані для однієї вершини – вони будуть перенесені на усі необхідні вершини, без необхідності розрахунку даної інформації для кожної з відповідних вершин окремо.

Вершини прототипи не обов'язково мають бути різними, коли у них різна інформація про нормалі. Тобто, можна об'єднати декілька вершин прототипів з єдиним місцеположенням, але усередину них закласти інформацію про те, які нормалі при цьому мають бути перенесені на які вершини. Таким чином можна мінімізувати кількість вершин, для яких виконується модифікація переміщенням, і єдині результати переміщення використовувати для найбільшого необхідного числа вершин.

За умов модифікації вершин, інформація про їх нормалі має бути певним чином розрахована. Найпоширенішим підходом є введення груп згладжування. Таким чином, кожен з полігонів може бути віднесений до певного числа груп згладжування. Дані полігони будуються у відношенні до прототипів вершин, тому будуть названі прототипами полігонів. На відміну від прототипів вершин, дані прототипи співвідносяться з полігонами у відношенні один до одного, тобто один прототип полігону відповідає одному полігону. Кожен з прототипів вершин використовується у декількох прототипах полігонів. При цьому, для груп полігонів, які мають хоча б одну спільну групу згладжування, прототип вершини матиме окреме значення нормалі. Дане значення нормалі буде розраховане як середнє значення перпендикулярів до кожного з даних прототипів полігонів після визначення місцеположення відповідних прототипів вершин.

Кожна з моделей може використовувати декілька матеріалів. В залежності від матеріалів можуть також використовуватись і різні набори текстур (наприклад: для дерева текстура дерева, для металевого вкращення – текстура металу). Для забезпечення подібного розділення введемо поняття

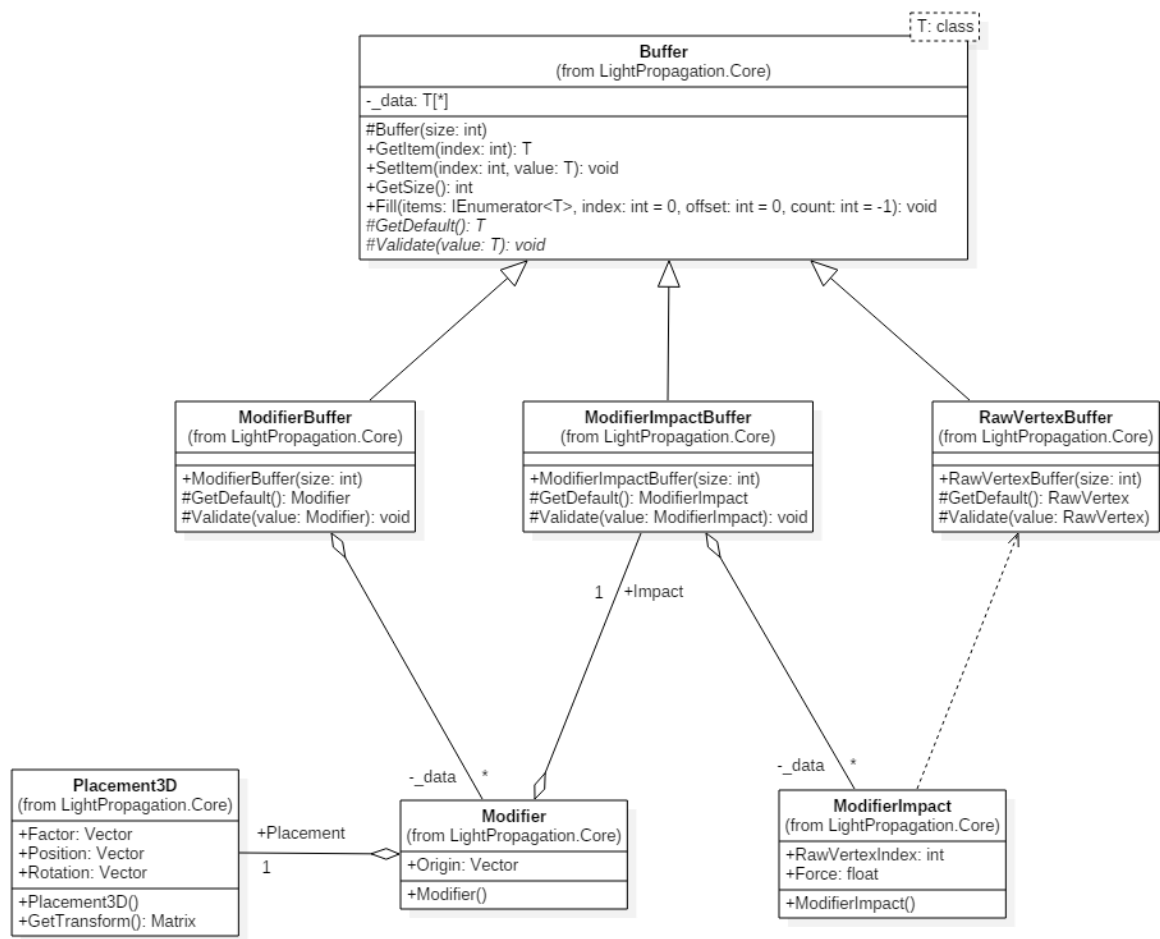
поверхні моделі – певної частини полігональної сітки, для якої буде застосований відповідний матеріал.



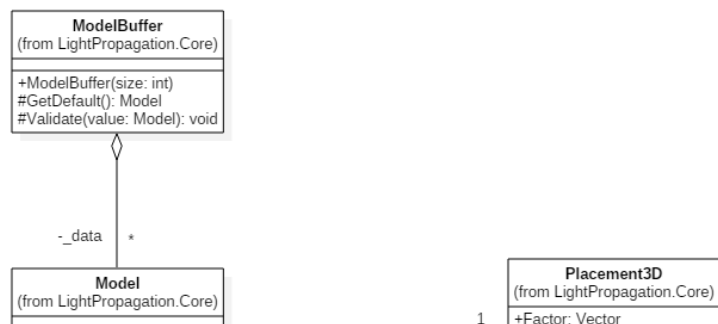
моделі у
простору
стерігача
ції будуть

стосовані ті ж
користування,
ення відносно

якого виконується зміна. Тобто – та точка, навколо якої буде виконаний початковий поворот з подальшими масштабом та переміщенням. Таким чином можна буде імітувати поведінку системи кісткової анімації, коли виконується зміна лише поворотів та не змінюються координати переміщення. Друга зміна – додання модифікатору прикладання зміни, яку назовемо силою. Дане значення є унікальним для кожної з вершин об’єкту, до якої застосовується дана зміна. Таким чином – за максимального значення сили, відповідна вершина буде переміщена на повну очікувану відстань, а за половини максимального значення – лише на половину. За допомогою даного механізму можна буде імітувати розтягнення об’єктів та менш різкі переходи між частинами.



дана інформація може бути розрахована окремо.



- визначення структури об'єкту;
- модифікація та оновлення інформації про вершини.

Перший крок розрахунків буде викликаний лише один раз під час завантаження нової моделі. Другий же крок буде викликаний під час кожної модифікації моделі за допомогою внутрішніх модифікаторів, а також під час завантаження нової моделі для виконання первинного розрахунку.

Помітимо, що для статичних моделей дані розрахунки будуть проведені лише один раз. Таким чином у режимі реального часу не буде необхідності у використанні додаткового часу для оновлення відповідної моделі.

Таким чином, етап визначення структури об'єкту складається з наступних підетапів:

- визначення для кожної з прототипів вершин тих прототипів полігонів, у яких вони використовуються;
- для кожної з прототипів вершин визначення груп полігонів зі спільними групами згладжування;
- для кожної з прототипів вершин визначення за групами полігонів визначення окремих потенційних вершин;
- для кожної з поверхонь визначення відповідних прототипів полігонів та формування списку результуючих полігонів та вершин;
- заповнення інформації про текстурні координати у вершинах базуючих на даних у поверхнях.

Етап модифікації та оновлення інформації про вершини складається з наступних підетапів:

- застосування модифікаторів до прототипів вершин;
- формування інформації про нормалі у прототипах вершин;
- перенесення інформації про положення та нормалі з прототипів вершин до вершин;
- визначення значень тангентів для кожного з полігонів;
- усереднення значень тангентів для вершин, які використовуються у відповідних полігонах;

- розрахунок значень бінормалей для кожної з вершин.

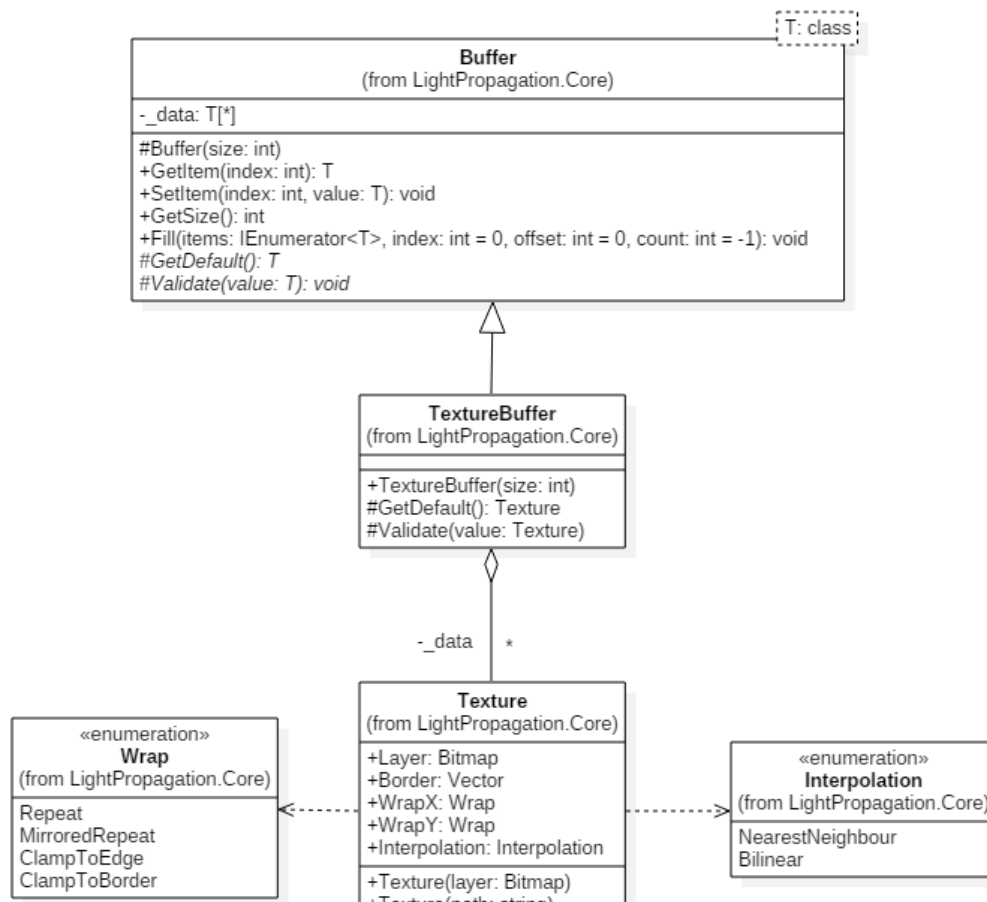
У результаті виконання даних розрахунків буде отримана модель, що може бути використана у процесах візуалізації чи розрахунку моделі освітлення віртуальної сцени.

Окрім моделей у сценах також наявні текстури, джерела світла та матеріали. Розглянемо детальніше кожне з цих понять.

Текстури являють собою спеціально підготовані зображення, доступ до яких відбувається у відмінному від класичного виді. Таким чином:

- кожна з координат зображення належить відрізку $[0, 1]$ і є дробовим числом, у той час як для звичайних зображень використовуються цілі числа та межі відповідають розрішенню зображення;
- дозволяється використовувати координати поза межами вказаного вище відрізка. У такому випадку дані координати певним обраним чином переводяться у координати з допустимого відрізка і обирається результуюче значення.

Відповідно до цього, для забезпечення відповідного функціоналу, обернемо системний клас зображення у спеціальну обгортку, котра дозволить виконувати операції за описаними вище правилами.



два додаткові
і відповідних
а якою будуть
пустими межі.
і визначення
з реальними

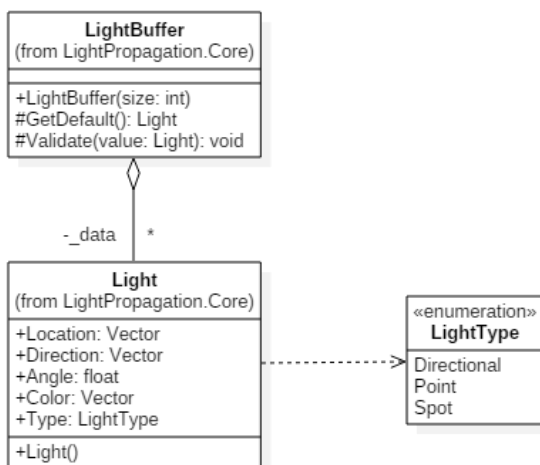
Таблиця 3.1 – Операції обробки текстурних координат за допустимими межами

Значення	Опис
Repeat	Якщо текстурна координата виходить за допустимі межі – дана координата буде взята за модулем одного
MirroredRepeat	Якщо текстурна координата виходить за допустимі межі – дана координата буде взята за модулем одного, та, коли цілочисельна частина ділення, є непарною – координата буде взята від правої межі текстури замість лівої
ClampToEdge	Якщо текстурна координата виходить за допустимі межі – дана координата набуде значення найближчої з меж
ClampToBorder	Якщо текстурна координата виходить за допустимі межі – у якості результату визначення кольору буде обране додаткове значення занесене у поле Border

Таблиця 3.2 – Операції визначення результуючого кольору текстури

Значення	Опис
NearestNeighbour	У якості результуючого кольору буде обрана та точка оригінального зображення, яка буде знаходитись найближче до текстурної координати
Bilinear	Для визначення результуючого кольору будуть обрані чотири сусідні точки навколо текстурної координати, та результуючий колір буде визначений за допомогою білінійної інтерполяції

Джерела світла були розглянуті у розділі 2.1.1. У програмному продукті усі різновиди джерел світла будуть об'єднані у один єдиний клас, що буде містити інформацію достатню для кожного з різновидів джерел світла, а також ідентифікатор поточного різновиду.



грама класів освітлення

для джерела освітлення містить наступну

глення (використовується для точкових та
ення);

ення (використовується для напрямлених
тлення);

- кут розповсюдження світла (використовується лише для точкових напрямлених джерел освітлення);
- колір розповсюджуваного світла;
- тип джерела освітлення.

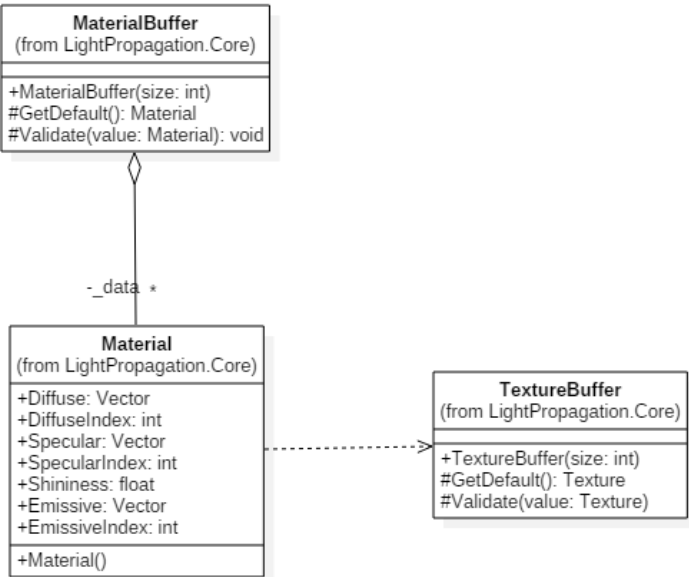
Таблиця 3.3 – Типи джерел освітлення

Значення	Опис
Directional	Напрявлене джерело освітлення
Point	Точкове джерело освітлення
Spot	Точкове напрямлене джерело освітлення

Для розрахунків освітлення використовується модель освітлення Фонга. Відповідно до неї сформована структура інформації про матеріали:

- коефіцієнти розсіювання світла;
- коефіцієнти відбиття світла;
- коефіцієнт блиску;
- коефіцієнти випромінювання світла тілом особисто.

Коефіцієнти розсіювання, відбиття та випромінювання для неоднорідних тіл можуть бути отримані з відповідних текстур. Таким чином, на кожну з таких груп коефіцієнтів додаються відповідні індекси на текстури. Якщо для розрахунків необхідно використати набір коефіцієнтів – відповідний індекс на текстуру буде встановлений у ключове значення: -1.



сів матеріалів
стур та процесів, ми отримуємо
на виконувати візуалізацію та
го простору
імірного простору є визначення
зрнених) з поверхнями об’єктів

Поверхні об'єктів віртуального тривимірного простору складаються з полігонів. Відповідно до цього, щоб знайти перетин деякого світлового променя з поверхнею певного об'єкта – необхідно знайти перетин даного світлового променя з будь-яким з полігонів даного об'єкту.

Кожен з полігонів належить певній тривимірній площині. Таким чином, щоб знайти перетин світлового променя з полігоном – для початку необхідно знайти перетин променя з відповідною площиною. Перетину променя з площиною може не бути. У такому випадку вважатимемо що даний промінь не перетинається з полігоном. У інакшому випадку – перетином променя та площини є точка. Дана точка може належати або не належати трикутнику на даній площині. Коли точка не належить трикутнику – вважаємо що даний промінь не перетинається з полігоном. Інакше – відповідно до координат токи перетину, виконуємо інтерполяцію по площині трикутника та визначаємо характеристики відповідної точки перетину.

Помітимо, що перетин світлового променя з об'єктами тривимірного простору може бути лише один. З-поміж усіх можливих перетинів обираємо той, що знаходиться найближче до початкової точки променя. Далі даної точки перетину саме цей світловий промінь не проходить. Однак, у результаті розрахунків явищ розповсюдження світла, може сформуватись додатковий світловий промінь, у якого точкою початку буде точка перетину попереднього світлового променя, та напрямком співпадатиме з напрямком попереднього світлового променя.

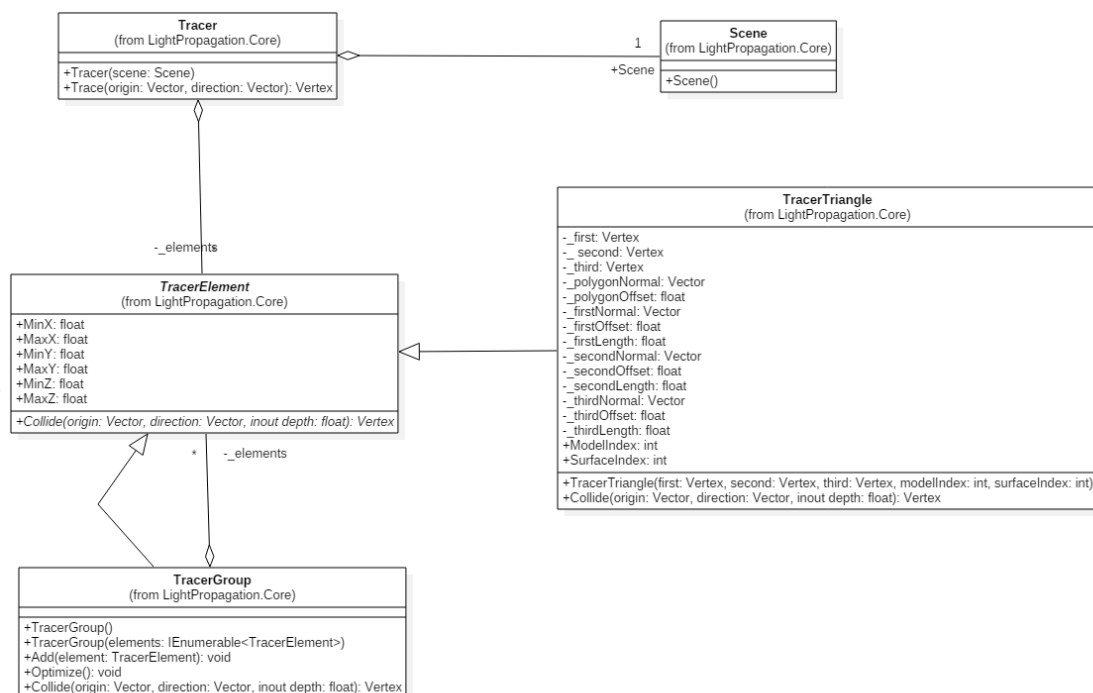
Для кожного з полігонів у нас відомою є інформація про координати трьох точок відповідного трикутника, разом з їх додатковими характеристиками. Інформації про саму площину, при цьому, у явному вигляді немає. Таким чином, для виконання перевірок перетинів світлових променів з полігонами, необхідно визначити характеристики відповідних площин, а саме – рівнянь площин. Результати даних розрахунків можуть бути використані для будь-яких світлових променів, і тому можуть бути розраховані лише один раз. Відповідно до цього розділимо процес трасування на два етапи:

- попередній розрахунок – визначення характеристик полігонів необхідних для перевірок перетинів променів (визначення рівнянь площин, тощо);
- знаходження безпосередніх перетинів.

Для збереження інформації про полігони разом з інформацією, необхідною для виконання перевірок та знаходження перетинів, створено відповідний клас – TracerTriangle.

З метою оптимізації розрахункових процесів, виконаємо об'єднання окремих трикутників у групи. Для кожної такої групи буде відомо, яку саме частину віртуального простору вони займають. Таким чином, коли світловий промінь не буде перетинати відповідний віртуальний простір – він не зможе перетнути також і те, що знаходиться у ньому та обмежено ним. Тобто – полігони що належать даному простору. Таким чином, виконавши перевірку перетину променя для частини простору ми зможемо відкинути необхідність виконання перевірок перетинів з певним числом полігонів. Інформацію про дані групи збережемо у класі TracerGroup.

Усі описані вище операції закладемо у клас Tracer. Даний клас, відповідно до опису віртуального тривимірного простору, виконуватиме його підготовку (формування TracerTriangle та TracerGroup), а також визначати перетини світлових променів з поверхнями тривимірних тіл.



тривимірному
просторі
цього
об'єктів

Сам механізм розрахунку розповсюдження світла у тривимірному просторі виконуватиме наступні задачі з визначення розповсюдження світлових променів у тривимірному віртуальному просторі:

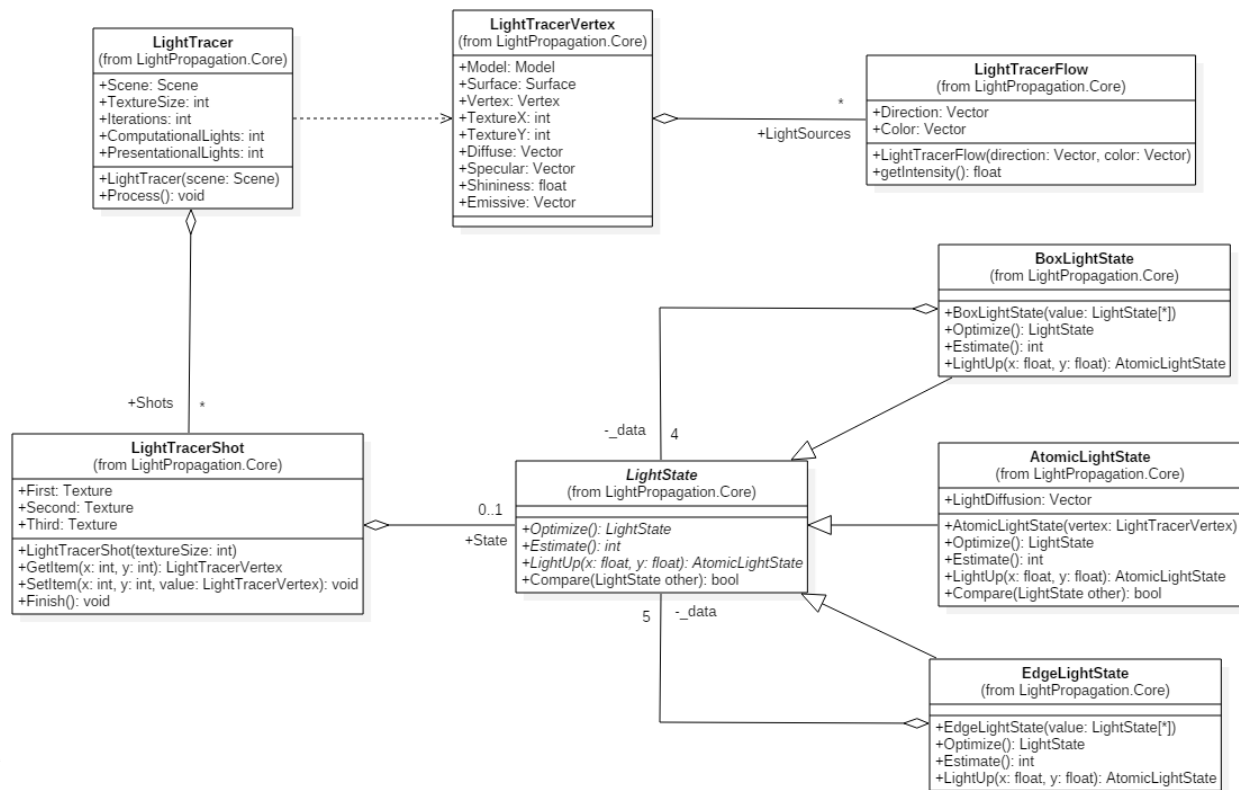
- визначення початкових світлових променів від відповідних джерел;
- визначення характеристик світла у точках перетину світлових променів та поверхонь об'єктів;
- визначення світлових променів, що утворюються у результаті розповсюдження світла поверхнями об'єктів.

З-поміж усіх можливих точок перетинів світлових променів та поверхонь тіл обирається певна підмножина, котра буде співставлена з відповідними світловими мапами, або координатною сіткою процедурних текстур. Кожна з даних точок перетину може не тільки накопичувати інформацію про світлові потоки, у яких вона приймає участь, але і зберігати набір інформації, що є необхідним для визначення світлових променів, що утворюються у результаті розповсюдження світла поверхнями об'єктів. Таким чином, коли відповідна інформація буде збережена у відповідній точці, вона зможе бути розрахована один раз на етапі попередньої підготовки, та використана, без необхідності повторного виконання розрахунків, під час розрахунку розповсюдження світла. Для збереження даної інформації слугує клас `LightTracerVertex`.

Результатом розрахунку розповсюдження світла у тривимірному просторі є інформація про світлові потоки у певному наборі точок простору. Дана інформація, як було відзначено вище, відповідає певним частинам світлових мап та координатної сітки процедурних текстур. Таким чином, залежно до встановлених співвідношень, інформацію можна перенести на відповідні структури даних.

Для збереження інформації для процедурної текстури використаємо структуру розрідженої сітки. Дана структура дозволяє об'єднувати групи сусідніх чотирьох комірок у єдину, коли інформація у них вважається еквівалентною. Таким чином можна скоротити загальну кількість комірок для збереження інформації про процедурні текстури.

Відповідно до описаних структур збереження інформації для процедурної текстури, розроблений набір класів, що наслідуються від єдиного інтерфейсу `LightState`. Повна ж інформація про розрахунки розповсюдження світла для певної поверхні у віртуальному просторі зберігається у класі `LightShot`, і складається з екземплярів `LightState`, що у сукупності представляють процедурну текстуру, та текстур для презентації інформації мапи освітлення.



вершинні шейдери, що описують інформацію про вершинні тривимірних об'єктів. У системі вершинні шейдери описані у класі `VertexShader`. Кожен окремий вершинний шейдер створюється шляхом наслідування базового класу.

Відсічення невидимих частин виконується для кожного з полігонів. Так є шість площин, що обмежують координати x та y у межах $[-1, 1]$, та координату z у межах $[0, 1]$. Усі частини полігонів, що знаходяться поза межами вказаних площин, відсікаються. Дані операції виконуються класом `Box`.

Визначення світлових характеристик виконується за допомогою піксельних шейдерів – окремих програм, що за інформацією про точку на поверхні тривимірного об'єкта визначають інформацію про результуюче

розроблені для виконання мінімально-необхідних розрахунків освітлення та слугують, в основному, для виконання усіх необхідних перевірок та порівнянь окремих підходів до моделювання освітлення.

3.4 Застосунок Editor

Застосунок Editor є віконною програмою, що використовує функціонал компонентів Core та Tools для виконання операцій над тривимірним простором, та надає візуальний інтерфейс до відповідних операцій.

Застосунок складається з трьох вікон:

- головне вікно;
- вікно налаштування та виконання моделювання освітлення;
- вікно відображення результатів візуалізації.

У головному вікні можна завантажити віртуальний тривимірний простір та за допомогою вікна попереднього перегляду обрати положення камери для виконання візуалізації. З даного вікна є доступ до усіх інших вікон застосунку.

Вікно налаштування та виконання моделювання освітлення дозволяє встановити параметри виконання моделювання, до числа яких входить кількість відбиттів світла від поверхонь тривимірних об'єктів, яку варто врахувати, а також об'єм інформації, який варто зберегти у результуючій процедурній текстурі. Окрім того, інтерфейс даного вікна дозволяє запустити процес моделювання освітлення. Поточний стан проходження процесу моделювання освітлення відображається на відповідних візуальних елементах.

Вікно відображення результатів візуалізації є вікном перегляду відповідного зображення, що формується шляхом растеризації чи трасування тривимірного віртуального простору. Окрім того, у даному вікні присутній інтерфейс налаштування процесу візуалізації, що дозволяє встановити розміри результуючого зображення, а також метод, за яким необхідно виконати візуалізацію. Кожен з методів виконання візуалізації відповідає певному піксельному шейдеру, що описані у додатковому компоненті Tools.

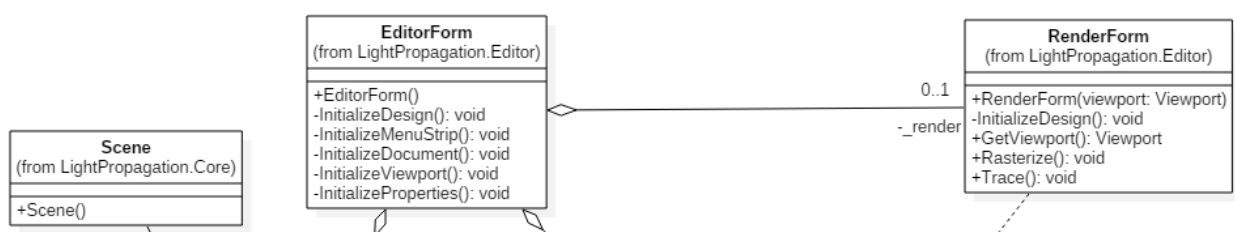


Рисунок 3.19 – Діаграма класів вікон застосунку Editor

3.5 Висновки до розділу

Для виконання моделювання освітлення за запропонованим підходом було розроблене програмне забезпечення «Light Propagation». Дане програмне забезпечення дозволяє завантажити опис віртуального тривимірного простору, виконати моделювання освітлення тривимірного віртуального простору, а також візуалізувати результати моделювання.

У якості платформи для розробки була обрана платформа .Net. Дана платформа є кросплатформенною, а отже і розроблений програмний продукт можна буде використати без певних обмежень до якоїсь окремої платформи.

Програмне забезпечення розділене на декілька компонентів. Окремо виділеною є бібліотека з центральними компонентами представлення тривимірного простору та моделювання освітлення. Таким чином, розроблений функціонал можна використати повторно у сторонньому програмному забезпеченні без необхідності виділення та перенесення вихідних кодів. Окремими компонентами також є бібліотека з додатковим набором функцій, що може також бути використана повторно, та візуальний інтерфейс для виконання моделювання освітлення та перегляду результатів візуалізації.

4 АНАЛІЗ РОЗРОБЛЕНОГО ЗАСОБУ МОДЕЛЮВАННЯ ОСВІТЛЕННЯ

4.1 Порівняння з існуючими підходами

Основними підходами до збереження інформації про статичне освітлення є:

- ненаправлені мапи освітлення;
- направлені мапи освітлення;
- направлені мапи освітлення з інформацією про відблиск.

У даній роботі запропонований новий підхід – збереження інформації про освітлення у спеціально підготовлених процедурних текстурах.

Кожному з підходів збереження відповідає певний підхід до відображення статичного освітлення. Таким чином, кожен підхід характеризується своїм алгоритмом та своїм необхідним мінімальним набором даних. Тобто, кожен з підходів характеризується своєю алгоритмічною складністю та вимогами до об'єму пам'яті. Дані параметри, разом з візуальним відображенням результатів моделювання освітлення, будуть порівняні у даному розділі.

Усі тестування виконуються на комп'ютері з наступними ключовими характеристиками:

- процесор: Intel® Core™ i3-3110M з тактовою частотою 2.4ГГц;
- оперативна пам'ять: 8ГБ.

Кожен з підходів, що базується на мапах освітлення, перевіримо двічі – з вибіркою даних за методом найближчий сусід (надалі NN – Nearest Neighbor) та білінійною інтерполяцією (надалі BI – Bilinear Interpolation).

Розрішення кожної з мап освітлення було встановлене у 16 пікселів у ширину та висоту.

4.1.1 Відображення відблисків

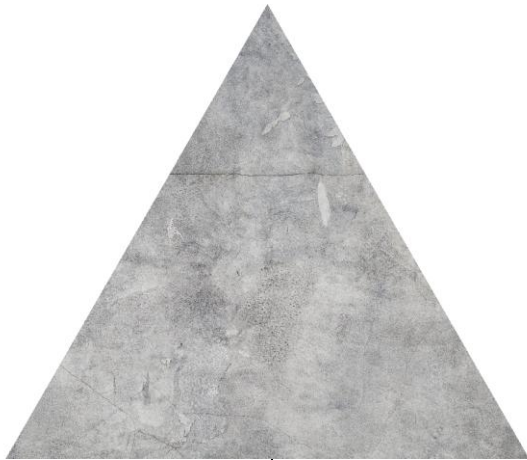
Кожна поверхня може відбивати певну частку світла, що падає на неї. Частина світла розсіюється у оточуючий простір рівномірно. У той же час –

певна частина світла може відобразитись у якомусь окремому певному напрямку. Дане явище має назву відблиск і буде перевірене у даному розділі.

Порівняння виконуватимемо у наступному тривимірному просторі:

- єдиний трикутник з поверхнею каменю;
- три напрямлені джерела світла – червоне, зелене та синє;
- кожне з джерел світла падає під своїм окремим кутом на поверхню;
- при цьому напрямок розповсюдження світла для кожного з джерел

утворює з площиною трикутника один і той же кут.



ного простору без урахування освітлення
я даного тривимірного простору для
унку статичного освітлення. Сформовані
іраних підходів форматах даних.
урсів для розрахунку відображення

Підхід	Пам'ять (байт)	Час відображення (NN) (мілісекунд)	Час відображення (BI) (мілісекунд)
Без освітлення	0	1552,233	-
Ненаправлені мапи	1024	1916,887	2276,838
Направлені мапи	2048	3102,908	3825,448

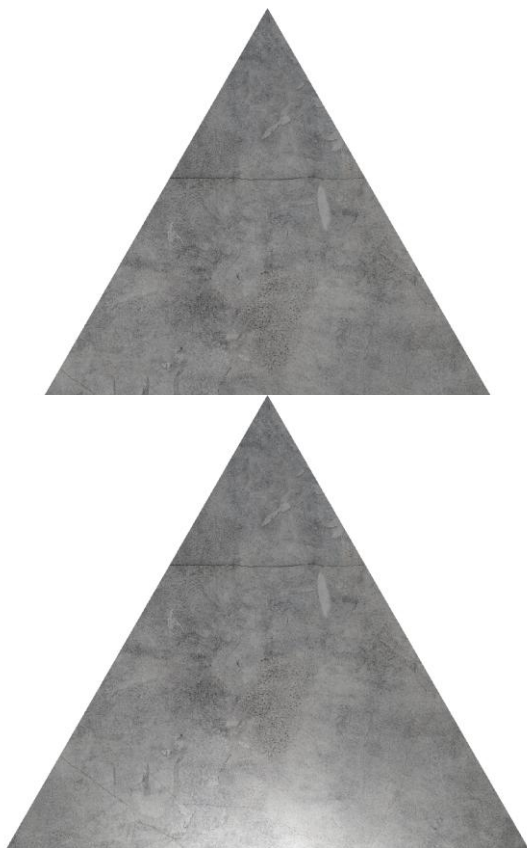
Продовження таблиці 4.1

Підхід	Пам'ять (байт)	Час відображення (NN) (мілісекунд)	Час відображення (BI) (мілісекунд)
Направлені мапи з відблиском	3072	3264,398	4356,257
Процедурні текстури	20	3971,556	-

З-поміж усіх підходів до статичного освітлення, підхід процедурних текстур вимагає найменшого об'єму пам'яті – 20 байт. Інші методи освітлення можуть вимагати у 50-100-150 разів більше.

За використанням ресурсів – підхід з процедурними текстурами вимагає найбільшого об'єму часу для виконання розрахунків – 3971,556 мілісекунд, що на 22% більше ніж час, необхідний для візуалізації освітлення підходом направлених мап освітлення з інформацією про відблиск. Однак, якщо розрахунки освітлення провести з використанням білінійної інтерполяції – підхід процедурних текстур витратить на 9% менше ніж підхід направлених мап освітлення з інформацією про відблиск, та на 4% більше ніж підхід направлених мап без інформації про відблиск.

Помітимо, що підхід процедурних текстур у даному випадку зберігає інформацію про усі вхідні напрямки світла. Якщо зменшимо кількість збережених напрямків світла з трьох (по одному на кожне джерело світла) до двох, то використання пам'яті зменшиться до 15 байт, тобто на 25%, а час необхідний для виконання візуалізації освітлення – до 3399,356. Таким чином, даний підхід буде вимагати на 11% менше часу ніж метод з використанням направлених мап освітлення з використанням білінійної інтерполяції. Однак, вимоги до часу ще будуть перевищувати вимоги до часу методу освітлення направлених мап з відблиском з визначенням кольору методом найближчого сусіда на 4%.



рного простору з використанням підходу
их мап освітлення

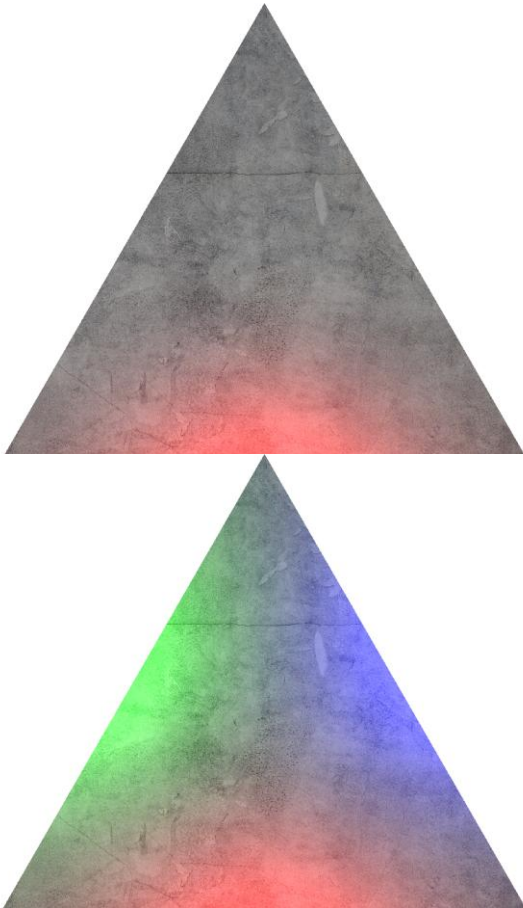
з направлених мап освітлення відсутня
д поверхні. На результуючому зображенні
мірне розсіювання світла у просторі.

рного простору з використанням підходу
х мап освітлення

ння дозволяє відобразити інформацію про
у сцені джерела світла розміщені таким

чином, що на зображенні мають бути відображені три відблиски замість одного наявного.

Помітимо, що у сцені присутні джерела світла, які випромінюють червоне, зелене та синє світло. У той же час, на зображенні наявний відблиск, колір якого є результатом об'єднання усіх світлових променів, що наявні у тривимірній сцені.



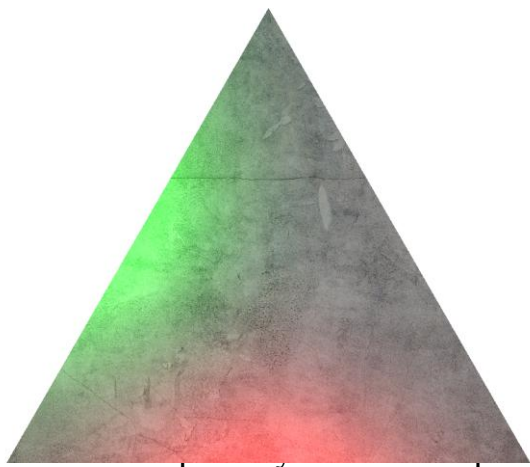
рного простору з використанням підходу
ня з інформацією про відблиск
ння з інформацією про відблиск дозволяє
інантного напрямку освітлення поверхні.
наявний відблиск від джерела освітлення,

рного простору з використанням підходу
рних текстур
екстур дозволяє зберігати інформацію про
гнення. Таким чином, як можна побачити
збережена та відображена інформація про
рмачії про кольори.

Для відображення усіх трьох відблисків правильного кольору довелося витратити на 22% часу у порівнянні з методом, що зберіг інформацію про єдиний відблиск разом з його кольором. Проте, якщо у попередньому методі використати підхід білінійної інтерполяції для визначення текстурних координат – різниця у часі скоротиться до 4%. При цьому, незалежно від обраного методу інтерполяції, для даного підходу вимоги до пам'яті залишаться на тому ж рівні 20 байт, що є у 150 разів менше за порівнюваний метод.

Відмітимо, що процедурні текстури можуть бути масштабовані. Як було вказано раніше – можливо у процедурній текстурі зберегти інформацію лише

про два відблиски замість усіх трьох. Результатом даного масштабування буде зменшення вимог до використання ресурсів на 25% по пам’яті та на 16% по часу.



ного простору з використанням підходу
рних текстур

зання статичного освітлення у наступному

дерева;

- єдине напрямлене джерело світла – у напрямку поверхні прямокутника;
- колір випромінюваного світла – білий;
- окремий трикутник, що перекриває частину розповсюджуваного світла;
- трикутник знаходиться поза видимою частиною простору і не приймає участі у відображенні.



ного простору без урахування освітлення
я даного тривимірного простору для
унку статичного освітлення. Сформовані
раних підходів форматах даних.
урсів для розрахунку відображення тіні

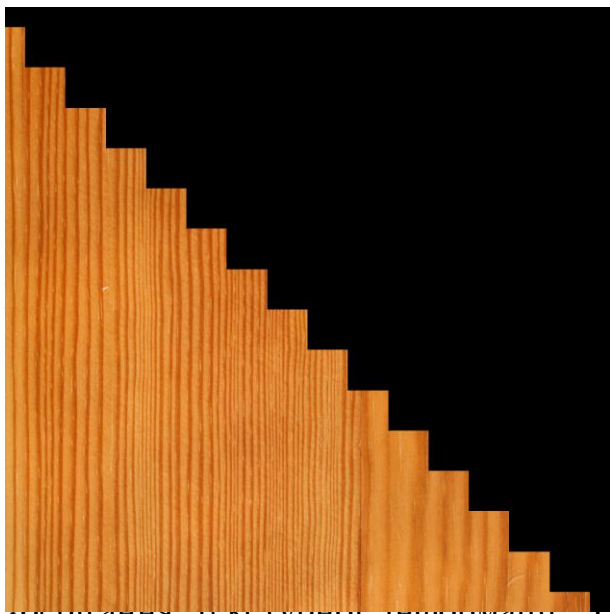
		Час відображення (NN) (мілісекунд)	Час відображення (BI) (мілісекунд)
		4947.809	-
		5981.501	6887.944
мапи			
Направлені мапи	2048	9682.183	11615.188
Направлені мапи з відблиском	3072	10285.784	13467.566

Процедурні текстури	2005	7722.963	-
------------------------	------	----------	---

Використання пам'яті для підходів з мапами освітлення, у порівнянні з попереднім тривимірним простором, залишились тими ж самими. Однак, для підходу на процедурних текстурах вимоги до об'єму пам'яті підвищились до 2005 байт, що майже відповідає об'єму пам'яті, що вимагає підхід направлених мап освітлення.

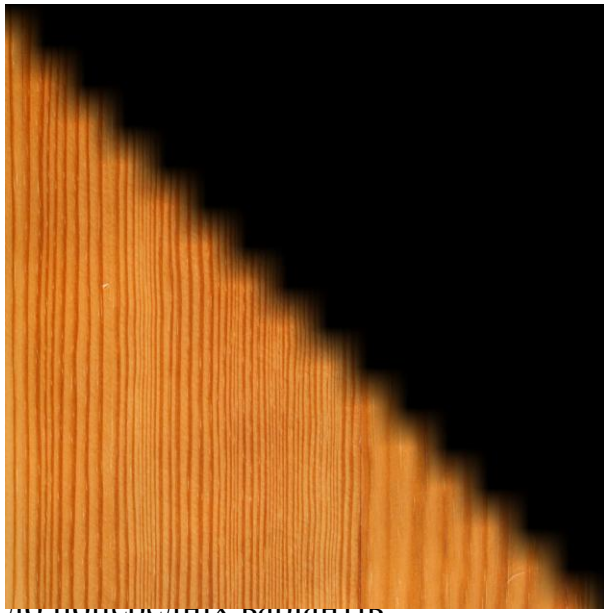
Як було вказано вище – підхід на основі процедурних текстур може бути масштабованим. Таким чином, якщо ми позбавимось інформації про домінуючі напрямки освітлення, то зменшимо використання пам'яті до 1470 байт. Дане значення перевищує вимоги до пам'яті ненаправленого підходу у 1.4 рази, однак менше за підходи з направленими мапами у 1.4 – 2 рази.

За вимогами до часу, підхід процедурних текстур знаходиться між підходом на основі ненаправлених мап освітлення та направлених мап освітлення, незалежно від обраного методу інтерполяції текстурних координат. Таким чином, даний метод вимагає на 25% менше пам'яті ніж підхід на основі направлених мап освітлення з інформацією про відблиск з використанням методу інтерполяції найближчий сусід, та на 43% з використанням методу білінійної інтерполяції.

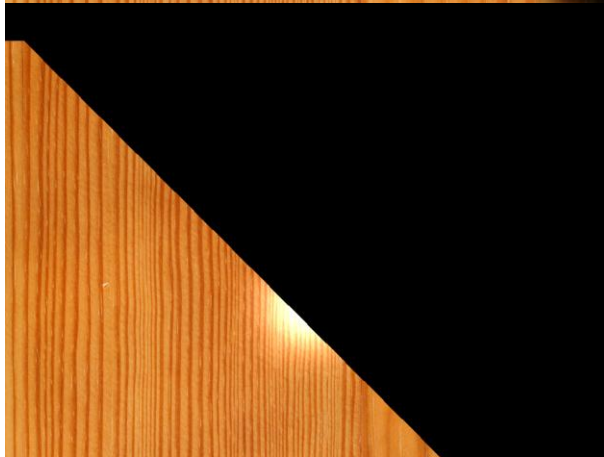
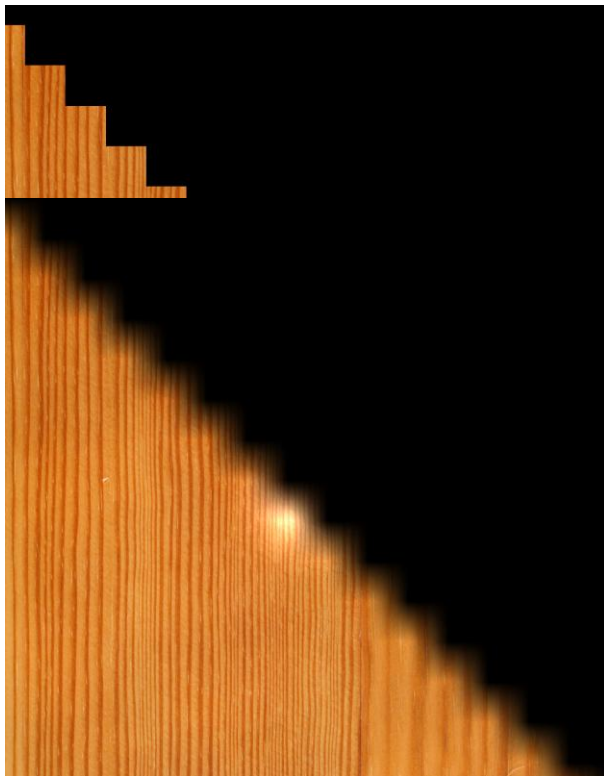


рного простору з використанням підходу
их мап освітлення
уло вказано раніше, інформацію лише про
отриманому зображенні інформація про
Як було вказано вище – тінь відкидає
цими межами простору. У той же час
у першу чергу, пов'язане зі способом
зосерпання текстурної інформації. Таким чином ми маємо набір комірок, у
кожній з яких може бути інформація про світло або тінь. Фактична лінія тіні

має ділити деякі комірки на декілька частин. Однак, інформацію про дані частини комірок зберегти можливості немає через обмеження та незмінність формат даних.



до попередніх варіантів.



ірного простору з використанням підходу

их мап освітлення

ції на білінійну інтерполяцію можемо

наближеним до очікуваного результату.

татом та очікуваним усе одно залишається

равлених мап освітлення на зображенні

Однак форма тіні залишається відповідною

ірного простору з використанням підходу

х мап освітлення

ірного простору з використанням підходу

х мап освітлення

іюляції, як було відмічено раніше, змінює

ла і на зміну форми відблиску – візуально

чення.

дає очікуваному – результат використання

ня з інформацією про відблиск буде

підходу направлених мап освітлення.

ірного простору з використанням підходу

рних текстур

женими до певної форми і розміру сітки.

ат даних дозволяє виконати розрахунки

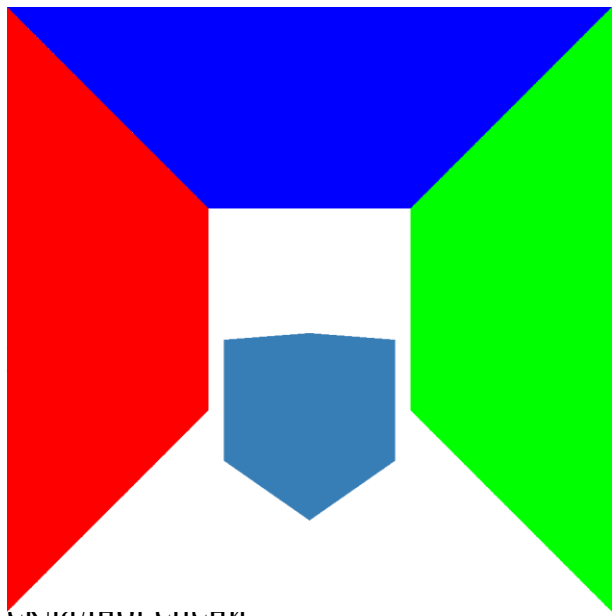
текстурної інформації незалежно від щільності та розмірності, та, як результат, формувати більш достовірне зображення. Дане явище можна побачити на результаті візуалізації.

Таким чином, для даного випадку розрахунку інформації про тіні, підхід процедурних текстур вимагає менше пам'яті та часу для виконання розрахунків ніж метод направлених мап, та при цьому дозволяє отримати більш достовірне зображення.

4.1.3 Освітлення складної сцени

Порівняємо підходи до моделювання статичного освітлення у наступному просторі:

- окрема кімната у видимій області;
- одна стінка – синього кольору, одна стінка – червоного кольору, одна стінка – зеленого кольору, три стінки – білого кольору;
- посередині кімнати розміщений куб, що повернутий, відносно стінок кімнати, на 45 градусів;
- єдине направлене джерело світла;
- кожна з поверхонь лише розсіює світло.



Складної сцени

ивимірному просторі без урахування
вітлення

я даного тривимірному просторі для
хунку статичного освітлення. Поточний
я освітлення сцени розсіяним світлом від
лі збережемо у відповідних до обраних

курсів для розрахунку відображення

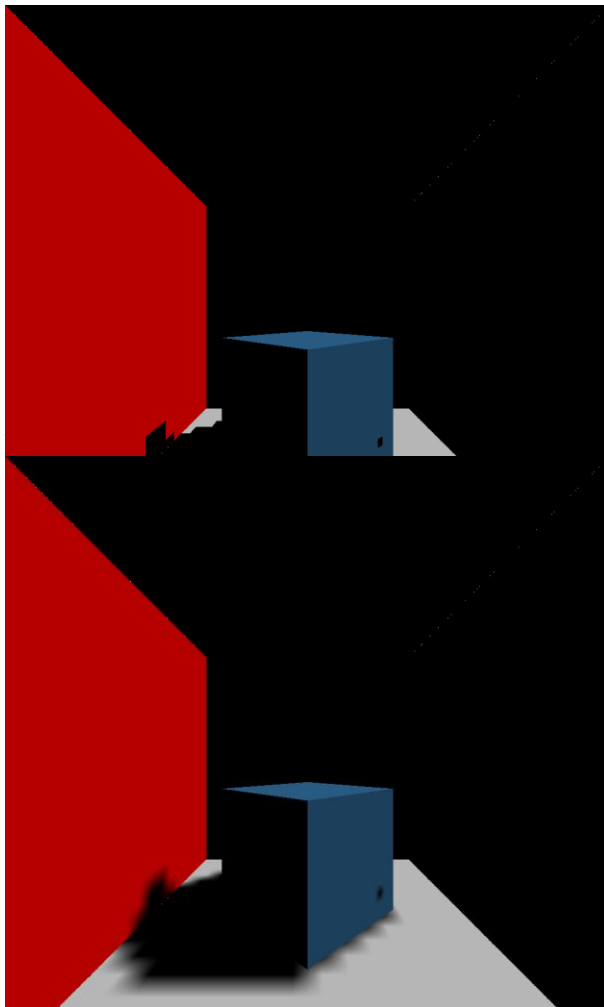
Підхід	Пам'ять (байт)	Час відображення (NN) (мілісекунд)	Час відображення (BI) (мілісекунд)

Без освітлення	0	3170.604	-
Ненаправлені мапи	11264	4170.856	5326.659
Направлені мапи	22528	7809.764	10060.442

Продовження таблиці 4.3

Підхід	Пам'ять (байт)	Час відображення (NN) (мілісекунд)	Час відображення (BI) (мілісекунд)
Направлені мапи з відблиском	33792	8366.737	12041.306
Процедурні текстури	2068	4691.471	-

Підхід процедурних текстур, у відповідному тесті, використовує найменший об'єм пам'яті, порівняно з підходами на основі текстурних мап. За використанням часу даний підхід вимагає більше часу ніж підхід з використанням ненаправлених мап освітлення з використанням методу інтерполяції найближчий сусід. У порівнянні з усіма іншими підходами на основі мап освітлення, даний метод вимагає менше часу у 1.1 – 2.6 разів.



ірного простору з використанням підходу
их мап освітлення

порівняннях – даний підхід зав'язаний на
формації. Відповідно до цього усі тіні мають
рок помічене як тінь. Покращити даний
оду білінійної інтерполяції.

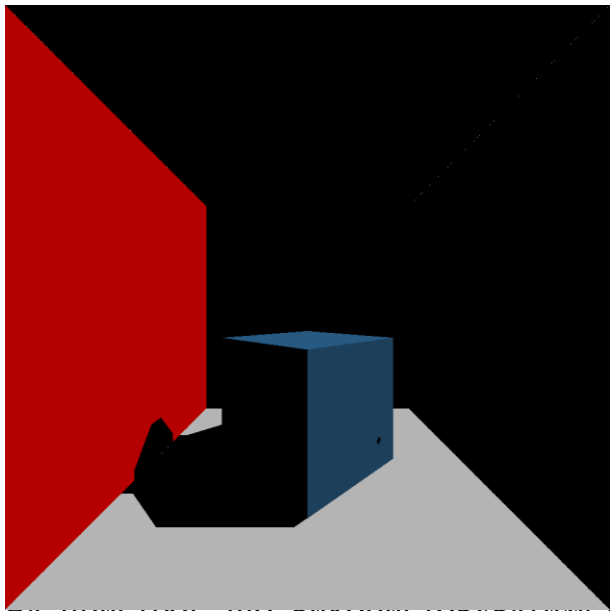
ірного простору з використанням підходу
их мап освітлення

ції на біліїну інтерполяцію можемо
наближенням до очікуваного результату.

Однак тіні усе одно мають характерну драбиноподібну форму і результуюче зображення не є повністю достовірним.

Підходи моделювання статичного освітлення з застосуванням направлених мап та направлених мап з інформацією про відблиск у даному випадку дадуть аналогічні результати. У першу чергу це пов'язано з тим, що кожна з поверхонь лише розсіює світло. Тобто, жодна з поверхонь не матиме відблиску, і використання підходів основною задачею яких є додати інформацію про відблиск буде надмірним.

Використання підходу процедурних текстур у даному випадку генерує тіні, що відповідають не сітці, а певній замкненій ламаній. Однак, можна помітити, що у певних місцях дана замкнена ламана не відповідає правильній побудові тіні. У першу чергу це пов'язане з обраним підходом до генерації процедурних текстур – перетворення зі сіткоподібної структури. Таким чином, через відсутність проміжних даних для кожної з комірок, визначити точне місцеположення проходження тіні є важкореалізуємою задачею.



на пристрої, що використовуватиметься для візуалізації певних тривимірних просторів

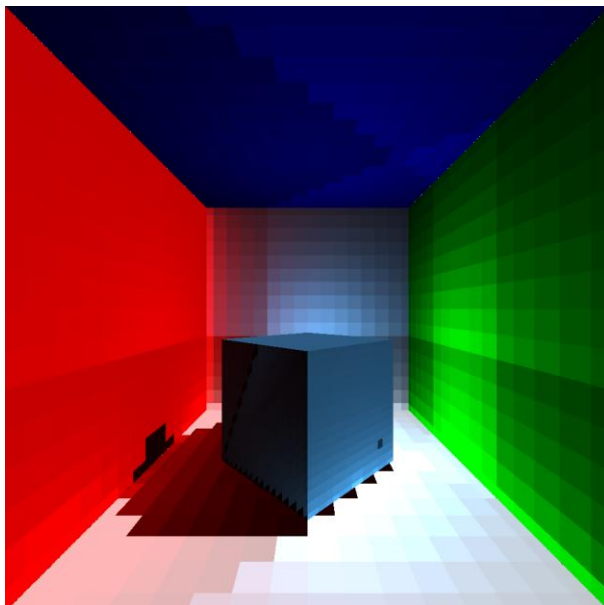
Повторимо розрахунок моделі освітлення даного тривимірного простору. Однак, для даної перевірки, врахуємо освітлення сцени розсіяним світлом від сусідніх об'єктів.

Вимоги до ресурсу часу змінились у межах 3 відсотків відносно відповідних попередніх значень. Таким чином, відношення вимог до часу кожного з даних підходів лишилось тим же самим.

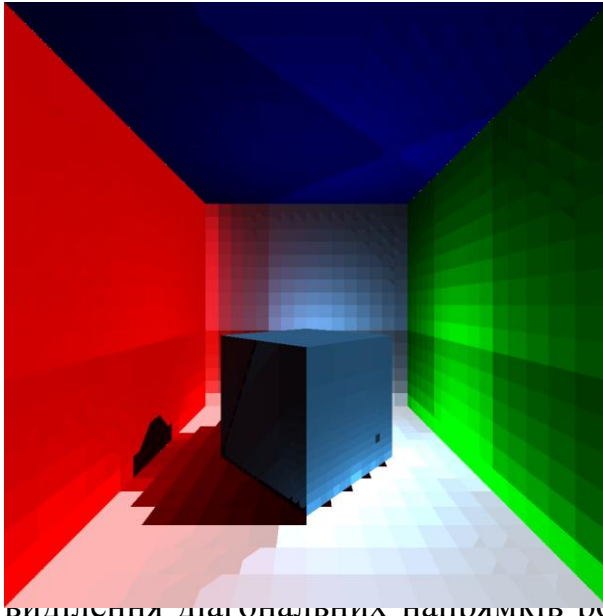
Основною зміною є вимоги до пам'яті за методом процедурних текстур – з 2068 байт вони збільшились до 29045, що є на 14% меншим ніж використання текстурної пам'яті підходом з використанням направлених мап з відблиском. Однак, як було помічено раніше, у даній сцені поверхні лише розсіюють світло і не створюють відблиски. З-поміж розглянутих підходів, підхід з використанням ненаправлених мап є тим підходом, що зберігає усю необхідну інформацію для виконання розрахунків та вимагає найменше пам'яті. У порівнянні з ним, підхід процедурних текстур вимагає у 2.6 разів більше пам'яті.

Таблиця 4.4 – Використання ресурсів для розрахунку відображення складної сцени

Підхід	Пам'ять (байт)	Час відображення (NN) (мілісекунд)	Час відображення (BI) (мілісекунд)
Без освітлення	0	3277.744	-
Ненаправлені мапи	11264	4142.383	5340.152
Направлені мапи	22528	7754.342	10462.395
Направлені мапи з відблиском	33792	8462.237	12316.154
Процедурні текстури	29045	4867.174	-

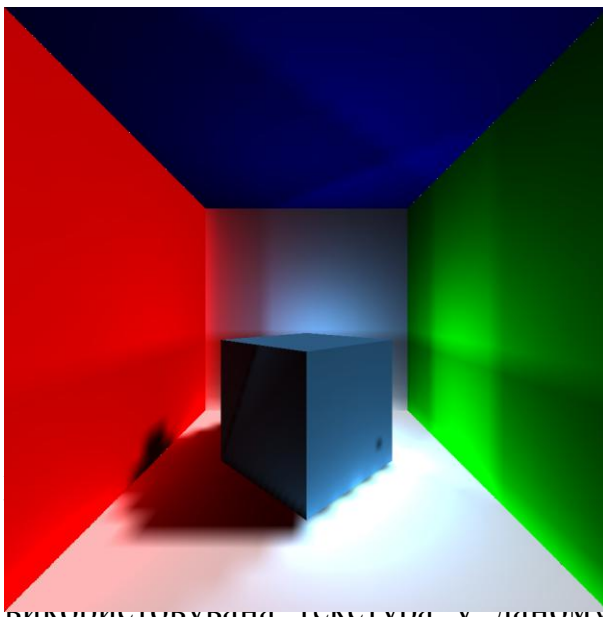


ірного простору з використанням підходу
их мап освітлення
світлення, на зображенні можна побачити
ження світла. Аналогічно до попередніх
зі структурою збереження інформації у



виділення діагональних напрямків розділення інформації про освітлення. Дані місця проявляються лише там, де освітлення є достатньо однорідним для відповідних операцій підготовки процедурних текстур.

Використання білінійної інтерполяції для підходу з ненаправленими мапами освітлення дозволяє уникнути відображення сіткоподібної структури сегментування світла. Таким чином, даний результат є найбільш достовірним з усіх порівняних варіантів. Однак, є певний ряд недоліків, на кшталт драбиноподібної структури тіней, які варто виправити.



використовувана текстура у даному місці не буде відповідати очікуваному результату, тобто – не буде достовірною. Відповідно до цього – потрібен буде механізм, що буде визначати області різких переходів, та виконуватиме операції інтерполяції лише поза ними.

ірного простору з використанням підходу
рних текстур

еатурних текстур, сіткоподібна структура
першу чергу, пов'язане з тим, що даний
омування процедурної текстури. Так як
різниця перевищує допустимі значення
ються незмінними.

мітити об'єднання окремих комірок та

розділення інформації про освітлення. Дані

місця проявляються лише там, де освітлення є достатньо однорідним для
відповідних операцій підготовки процедурних текстур.

Використання білінійної інтерполяції для підходу з ненаправленими
мапами освітлення дозволяє уникнути відображення сіткоподібної структури
сегментування світла. Таким чином, даний результат є найбільш достовірним з
усіх порівняних варіантів. Однак, є певний ряд недоліків, на кшталт
драбиноподібної структури тіней, які варто виправити.

ірного простору з використанням підходу
их мап освітлення

можна перенести і на підхід використання
бхідно буде вирішити ряд додаткових
чення окремих областей, у яких варто
верхні тіла можуть бути певні області з
користанням інтерполяції – дані області
з різкого на поступовий. Таким чином

місці не буде відповідати очікуваному
результату, тобто – не буде достовірною. Відповідно до цього – потрібен буде
механізм, що буде визначати області різких переходів, та виконуватиме
операції інтерполяції лише поза ними.

4.2 Висновки до розділу

Були порівняні підходи до моделювання статичного освітлення у віртуальному тривимірному просторі. Для кожного з підходів були визначені використання ресурсів персонального комп'ютеру: часу та пам'яті. Окрім того, результати моделювання кожного з підходів були порівняні візуально.

Підхід з використанням процедурних текстур дозволяє отримати більший об'єм інформації. Як було показано – даний підхід дозволяє сформувати інформацію про декілька відблисків у тих місцях, де методи, що базуються на мапах освітлення, дозволяють отримати інформацію не більш ніж про один відблиск.

У тривимірному просторі з однорідним розповсюдженням світла, підхід з використанням процедурних текстур дозволяє уникнути драбиноподібного спотворення меж тіней, що може бути наявним у підходах з використанням мап тіней.

У всіх розглянутих випадках, підхід з використанням процедурних текстур, за використанням пам'яті та часу, не перевищував найгірші показники для підходів, що базуються на використанні мап освітлення.

Підхід використання процедурних текстур виявив свої недоліки у середовищі з неоднорідним освітленням. Відповідно до цього був визначений ряд майбутніх доробок, відповідно до яких можна буде визначені недоліки приховати.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У даній магістерській дисертації був розроблений засіб моделювання освітлення у віртуальному тривимірному просторі, що базується на використанні процедурних текстур.

Загальноживані методи, що базуються на використанні мап освітлення, були розглянуті у першому розділі. Для кожного з них були виявлені певні обмеження, а також запропоновані шляхи їх усунення з використанням підходу процедурних текстур.

Для формування моделі освітлення у віртуальному тривимірному просторі була сформована відповідна модель розрахунку освітлення. У основі даної моделі розрахунку лежать апроксимації фізичних законів розділу оптики, а саме модель розповсюдження світла Фонга та спрощені представлення джерел світла та їх випромінювання.

Відповідно до розробленої моделі було розроблене програмне забезпечення, що дозволяє завантажити опис віртуального тривимірного простору, змодельовати освітлення у ньому та виконати візуалізацію. Окремі частини даного програмного забезпечення, що використовуються для моделювання освітлення, виділені у повторно використовувані модулі.

Розроблена модель освітлення була порівняна з розглянутими загальноживаними методами. За результатами тестування було виявлено використання меншого об'єму пам'яті для збереження інформації про розповсюдження світла. Використання часу для виконання візуалізації, при цьому, не перевищувало найгіршого випадку з-поміж загальноживаних методів.

Під час тестування було виявлено, що розроблена модель не надає належних візуальних результатів для віртуальних просторів з неоднорідним освітленням. Відповідно до цього були запропоновані методи, за допомогою яких можна буде покращити дану модель освітлення.

Таким чином в результаті проведеної роботи була досягнута поставлена мета дослідження.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Akenine-Moller Tomas. Real-Time Rendering, Third Edition / Tomas Akenine-Moller, Eric Haines, Naty Hoffman. – К.: A K Peters/CRC Press, 2008. – 1045 с.
2. Deferred Shading (Отложенное освещение) / Термины / Программирование игр / GameDev.ru — Разработка игр [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.gamedev.ru/terms/DeferredShading>
3. Dunn Fletcher. 3D Math Primer for Graphics and Game Development (Wordware Game Math Library) / Fletcher Dunn, Ian Parberry. – К.: Jones & Barlett Learning, 2002. – 239 с.
4. Eisemann Elmar. Real-Time Shadows / [Elmar Eisemann, Michael Schwarz, Ulf Assarsson та ін.]. – К.: A K Peters/CRC Press, 2011. – 398 с.
5. Foley James. Computer Graphics: Principles and Practice in C (2nd edition) / [James D. Foley, Andries van Dam, Steven K. Feiner та ін.]. – К.: Addison-Wesley Professional, 1995. – 1200 с.
6. Guo Hongyu. Modern Mathematics and Applications in Computer Graphics and Vision / Hongyu Guo. – К.: World Scientific Publishing Company, 2014. – 524 с.
7. Haines Eric. An Introduction to Ray Tracing (The Morgan Kaufmann Series in Computer Graphics) / [Eric Haines, Pat Hanrahan, Robert L. Cook та ін.]. – К.: Academic Press, 1989. – 327 с.
8. Hughes John F. Computer Graphics: Principles and Practice (3rd Edition) / [John F. Hughes, Andries van Dam, Morgan McGuire та ін.]. – К.: Addison-Wesley Professional, 2013. – 1264 с.
9. Lander Jeff. Graphics Programming Methods / Jeff Lander. – К.: Charles River Media, 2003. – 406 с.
10. Lengyel Eric. Mathematics for 3D Game Programming and Computer Graphics, Third Edition / Eric Lengyel. – К.: Cengage Learning PTR, 2011. – 576 с.

11. Lightmass Basics [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://docs.unrealengine.com/en-us/Engine/Rendering/LightingAndShadows/Lightmass/Basics>
12. Mark de Berg. Computational Geometry: Algorithms and Applications / [Mark de Berg, Otfried Cheong, Marc van Kreveld та ін.]. – К.: Springer, 2008. – 386 с.
13. Marschner Steve. Fundamentals of Computer Graphics, Fourth Edition / Steve Marschner, Peter Shirley. – К.: A K Peters/CRC Press, 2015. – 748 с.
14. Myers Kevin. Integrating Realistic Soft Shadows into Your Game Engine [Електронний ресурс] / Kevin Myers, Randima Fernando, Louis Bavoil . – Режим доступу : http://developer.download.nvidia.com/whitepapers/2008/PCSS_Integration.pdf
15. Policarpo Fabio. Deferred Shading Tutorial [Електронний ресурс] / Fabio Policarpo, Francisco Fonseca. – Режим доступу : <http://gamedevs.org/uploads/deferred-shading-tutorial.pdf>
16. Unity – Manual: Lightmap directional modes [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://docs.unity3d.com/Manual/LightmappingDirectional.html>
17. Vince John. Geometry for Computer Graphics / John Vince. – К.: Springer, 2004. – 342 с.
18. Vince John. Mathematics for Computer Graphics / John A. Vince. – К.: Springer, 2005. – 247 с.
19. Виртуальная реальность и устройства для виртуальной реальности [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://oculus-rift.ru/virtual-reality-and-devices/>
20. Цисарж В. Математические методы компьютерной графики / В. Цисарж, Р. Марусик. – К.: Факт, 2004. – 464 с.
21. Шматов Я.Р. Модель освітлення у віртуальній реальності, що базується на технології процедурних текстур / Я.Р. Шматов // Весняні наукові читання: матеріали IX Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції. – 2017. – ч. 1. – С. 58-64.

22. Шматов Я.Р. Процедурний підхід до моделювання освітлення у віртуальній реальності / Я.Р. Шматов, І.В. Баклан // Актуальні наукові проблеми. Розгляд, рішення, практика: матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції. – 2017. – ч. 2. – С. 164-168

ДОДАТОК А

Діаграма класів представлення тривимірного простору

ДОДАТОК Б**Діаграма класів розрахунку моделі освітлення**

ДОДАТОК В
Екрани додатку

ДОДАТОК Г
Результати роботи

